

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**UHKA AVARUUDESTA – SATELLIITTIEIN KYKY JA RAJOITTEET HAVAITA
TAISTELUALUKSIA SUOMEN RANNIKOLLA**

Pro gradu -tutkimus

Yliluutnantti
Juuso Mikkola

Sotatieteiden maisterikurssi 5
Merisotalinja

Huhtikuu 2016

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 5	Linja Merisotalinja
Tekijä Juuso Mikkola	
Tutkielman nimi UHKA AVARUUDESTA – SATELLIITTIENTEN KYKY JA RAJOITTEET HAVAITA TAISTELUALUKSIA SUOMEN OLOSUhteissa	
Oppiaine, johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka Kurssikirjasto (MPKK:n kirjasto)
Aika Huhtikuu 2016	Tekstisivuja 80 Liitesivuja 50
TIIVISTELMÄ <p>Satelliittitiedustelun avulla voidaan etsiä aluksia saaristosta ja käyttää saatua paikkatietoa aluksen maalittamiseen eri asejärjestelmillä ja -laveteilla. Tutkimuksessa selvitettiin Venäjän satelliittitiedustelun muodostamaa uhkaa Merivoimien taistelualuksille. Tätä lähestyttiin selvittämällä satelliittien ratamekaniikan ja sensorityypin vaikutus alusten havaitsemiseen sekä Venäjän tämän hetkinen kyky satelliittitiedusteluun. Satelliittitiedustelun osaluista tässä tutkimuksessa käsitellään kuvaustiedustelua.</p> <p>Tutkimusmenetelmiksi valikoituvat kirjallisuustutkimus ja simulointi. Tutkimuksessa esitellään satelliittien yleisiä ominaisuuksia ja kiertoradan vaikutusta kuvaustehtävään. Lisäksi tarkastellaan eri kuvaustiedustelusatelliittityyppien ominaispiirteitä ja käyttörajoituksia sekä Venäjän käytössä olevia sotilaallisia ja kaupallisia kuvaussatelliitteja. Nämä aineistot muodostavat kirjallisuustutkimuksen, jonka avulla luotiin teoriapohja satelliittien kuvausmahdollisuuksien ja -tiheyden simuloinnille ja selvittiin simulointiin vaadittavat taustatiedot. Simuloinnilla selvitettiin Venäjän kuvaussatelliittien kuvausmahdollisuuksia eri olosuhteissa ja vuodenaikoina Etelä-Suomen alueella.</p> <p>Työn keskeisiksi tuloksiksi nousivat elektro-optisten kuvaussatelliittien varsin huono soveltuvuus puolet vuodesta Suomen olosuhteisiin ja se, että Venäjän kuvaussatelliitit koostuvat pääasiallisesti tai jopa kokonaan elektro-optisista satelliiteista. Satelliittitiedustelun uhka taistelualuksia kohtaan on tällä hetkellä siis varsin pieni ja sitä voidaan väistää lisäksi osittain huomioimalla satelliittien mahdolliset kuvausajankohdat. Tulevaisuudessa etenkin kaupallisten satelliittien puolella Venäjän suorituskyky on kuitenkin kasvamassa merkittävästi. Tutkimuksen johtopäätöksinä muodostettiin myös toimenpidesuosituksia Merivoimille satelliittitiedustelu-uhan pienentämiseksi. Näitä ovat muun muassa alushenkilöstön perehdyttäminen satelliittien kuvauskykyyn ja rajoituksiin, satelliittien ratojen simulointi harjoituksissa ja mahdollisten kuvausten väistämisen harjoittelu sekä ajantasaisen luettelon ylläpitäminen Venäjän käytössä olevista tiedustelusatelliiteista.</p> <p>Tutkimus keskittyy Venäjän kuvaussatelliittien mahdolliseen kuvaustiheyteen ja kuvausten välillä olevan ajan määrittämiseen. Mahdollisina jatkotutkimusaiheina esille nousevat muun muassa kuvan analysointiin vaadittava aika, Venäjän suorituskyvyn kasvu tulevaisuudessa ja pienoissatelliittien sotilaalliset käyttömahdollisuudet.</p>	
AVAINSANAT Satelliittitiedustelu, kuvaustiedustelu, tiedustelu, satelliitit, avaruus, Venäjä	

SISÄLLYSLUETTELO

1. Johdanto	1
1.1 Tutkimuksen aihe ja tutkimusongelmat	1
1.2 Tutkimuksen rakenne ja tutkimusmenetelmät	3
1.3 Työn keskeiset rajaukset ja aikaisempi tutkimus	6
2. Satelliittien yleiset ominaisuudet	9
2.1 Satelliittien rata	9
2.2 Ratakorkeus	11
2.3 Radan kallistuskulma	14
2.4 Alueellinen erottelukyky ja kattavuus	16
2.5 Ajallinen kattavuus	19
2.6 Satelliitin elinkaari	19
3. Eri satelliittityypit tiedustelukäytössä	22
3.1 Optiset ja elektro-optiset kuvaussatelliitit	23
3.2 Tutkasatelliitit	37
4. Alusten havaitseminen ja maalittaminen	43
5. Venäjän resurssit	50
5.1 Käytössä olevat sotilassatelliitit	50
5.2 Kaupalliset satelliittipalvelut	57
5.3 Tulevaisuus	62
6. Simulointi	66
6.1 Simuloinnin taustatiedot ja mallinnuksessa käytetyt arvot	66
6.2 Simuloinnin tulokset	70
7. Johtopäätökset	75
7.1 Tutkimuskysymykset	75
7.2 Tutkimusongelma ja johtopäätökset	77
7.3 Toimenpidesuosituksien ja mahdolliset jatkotutkimusaiheet	79

Lähteet

Liitteet

KUVAT

	Sivu
Kuva 1. Simuloinnin käyttötavat	5
Kuva 2. Aurinkosynkronisen radan ratatason kääntyminen auringon suhteen	10
Kuva 3. Yleisimmät satelliittien kiertoratatyypit	11
Kuva 4. Ratakorkeuden vaikutus satelliitin ratakierron kestoon	12
Kuva 5. Satelliitin korkeuden vaikutus sensorin jalanjälkeen	13
Kuva 6. Elliptinen kiertorata	13
Kuva 7. Kiertoradat satelliitin radan inklinaation mukaan	14
Kuva 8. Naparadalla olevan satelliitin ratojen päällekkäisyys napa-alueella	15
Kuva 9. Satelliitin inklinaation ja ratakorkeuden yhteys aurinkosynkronisella radalla	16
Kuva 10. Pikselikoon vaikutus kuvan muodostumiseen	16
Kuva 11. Näkökentän laajuuteen ja kuva-alan leveyteen liittyvä trigonometria	17
Kuva 12. Avaruusromun määrän lisääntyminen Maan kiertoradoilla	12
Kuva 13. Kuvien terävöitys korkearesoluutioiseksi värikuvaksi	25
Kuva 14. Sensorielementin koon ja optiikan polttovälin vaikutus resoluutioon	26
Kuva 15. Rayleighin kriteeri	27
Kuva 16. Optiikan halkaisijan ja polttovälin suhde resoluutioon (ratakorkeus 600 km, aallonpituus 450 nm)	28
Kuva 17. Landsat 7-satelliitin ilmaisinmatriisi	31
Kuvat 18. Kuvauskulman vaikutus kuvan tarkkuuteen	32
Kuva 19. Vasemman puolinen kuva suoraan nadiirissa kuvattuna ja oikean puolinen kuva 60° kulmalla kuvattuna (vääristymät korjattuna)	32
Kuva 20. Pikselikoon kasvu kuvattaessa sivuun nadiirista (ratakorkeus 400 km)	33
Kuva 21. Erottelukykyyn kasvun rajaksi määritetty 125 % alkuperäisestä koosta suhteessa satelliitin ratakorkeuteen	34
Kuva 22. Pilvisyys Utön ja Rankin alueilla kuukausittain	36
Kuva 23. Synteettisen apertuurin pituus	37

Kuva 24.	Optisen alueen ja tutka-alueen kuvauskulmat	38
Kuva 25.	SAR-kuvaukseen liittyviä kulmia ja käsitteitä	39
Kuva 26.	SAR-tutkan resoluutiosolu	40
Kuva 27.	SAR-tutkan yleisimpien toimintamuotojen erot	42
Kuva 28.	Maalittamisprosessin vaiheet	46
Kuva 29.	Muutostulkinta yksinkertaistettuna	29
Kuva 30.	Norjalainen KNM Hauk tukeutuneena saareen	47
Kuva 31.	Arctech Helsinki Shipyardin telakkahalli	47
Kuva 32.	Venäjän kuvaustiedusteluun soveltuvien sotilassatelliittien tiedot	52
Kuva 33.	Mahdollisesti Persona-satelliitin ottama kuva	53
Kuva 34.	Persona-satelliittien ratakorkeus ajan suhteen	53
Kuva 35.	Kondor-E-satelliitin tutkan antenni ja havainnekuva satelliitista avaruudessa	54
Kuva 36.	Kondor-E -satelliitin kuva Angolan rannikolta	55
Kuva 37.	Kondor-satelliitin ratakorkeus ajan suhteen	55
Kuva 38.	Bars-M-satelliitti	56
Kuva 39.	Bars-M-satelliittien ratakorkeus ajan suhteen	57
Kuva 40.	Venäjän kuvaustiedusteluun soveltuvien kaupallisten satelliittien tiedot	59
Kuva 41.	Kanopus-V1 ja satelliitin ottama kuva Norfolkista vuonna 2013	60
Kuva 42.	Resurs-P-satelliitin havainnekuva ja P-3-satelliitin ottama kuva Hampurista vuonna 2016	61
Kuva 43.	Venäjän kaupallisten satelliittien ratakorkeudet	62
Kuva 44.	Venäjän kaupalliset kuvaussatelliitit vuoteen 2020 mennessä	64
Kuva 45.	Valon määrän jakautuminen kuukausittain	68
Kuva 46.	Todennäköisyydet kuvaussuoritusten lukumäärälle vuoden aikana	73
Kuva 47.	Vuorokausittain kuvausten välille jäävä aika vuoden mittaan	74
Kuva 48.	Auringon korkeuskulma tammikuusta huhtikuuhun	Liite 1 2

Kuva 49.	Auringon korkeuskulma toukokuusta elokuuhun	Liite 1	3
Kuva 50.	Auringon korkeuskulma syyskuusta joulukuuhun	Liite 1	4
Kuva 51.	Pilvisten ja aurinkoisten päivien määrä keskimäärin Utössä	Liite 2	2
Kuva 52.	Pilvisten ja aurinkoisten päivien määrä keskimäärin Rankissa	Liite 2	2
Kuva 53.	Hangon satama 10 m resoluutiolla kuvattuna	Liite 3	1
Kuva 54.	Hangon satama 20 m resoluutiolla kuvattuna	Liite 3	1
Kuva 55.	Hangon satama 60 m resoluutiolla kuvattuna	Liite 3	2
Kuva 56.	Suurennos kuvasta 53 ja etäisyyden mittaus QGIS-ohjelmistolla	Liite 3	2
Kuva 57.	QGIS-ohjelmiston mittaustyökalun käyttö Google Earth -kuvassa	Liite 3	3
Kuva 58.	Orbview 3 -satelliitin kuvat Porkkalanniemestä 20.5.2006 ja 20.6.2006	Liite 4	1
Kuva 59.	Alueen valinta ja suurennos kuvasta 58	Liite 4	2
Kuva 60.	Kohteen lisääminen 20.6.2006 otettuun kuvaan	Liite 4	2
Kuva 61.	Muutostulkinta kahden eri päivänä otetun kuvan välillä	Liite 4	3
Kuva 62.	Maanmittauslaitoksen tuottamat vesialueiden rajat vektoritasona Porkkalanniemen alueelta	Liite 4	3
Kuva 63.	Maa-alueen poissuodattaminen muutostulkinnasta vektoritason avulla	Liite 4	4
Kuva 64.	Rantaviivan lisääminen muutostulkinnan tulokseen vektoritason avulla	Liite 4	4
Kuva 65.	Kohteiden havaitseminen muutostulkinnan tuloskuvasta	Liite 4	5
Kuva 66.	TLE-formaatin selitteet	Liite 5	1
Kuva 67.	Persona 2 -satelliitin rata ja sensorin kattama alue 6.1.2016 klo 12:09 ja 13:52	Liite 7	4
Kuva 68.	Tammikuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	5
Kuva 69.	Helmikuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	7
Kuva 70.	Resurs-P1 -satelliitin rata ja sensorin kattama alue 17.3.2016 klo 10:20 ja 11:55	Liite 7	9
Kuva 71.	Maaliskuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	10
Kuva 72.	Huhtikuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	12
Kuva 73.	Toukokuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	14

Kuva 74.	Kesäkuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	16
Kuva 75.	Heinäkuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	18
Kuva 76.	Elokuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	20
Kuva 77.	Syyskuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	22
Kuva 78.	Lokakuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	24
Kuva 79.	Marraskuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	26
Kuva 80.	Joulukuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi	Liite 7	28

TAULUKOT

			Sivu
Taulukko 1.	MPKK:lla tehty tutkimuksen aiheeseen liittyvät opinnäytetyöt		7
Taulukko 2.	STANAG 3769 mukaiset erottelukykyvaatimukset		44
Taulukko 3.	Resurs-DK1-satelliitin tekniset tiedot		59
Taulukko 4.	Kanopus-V1-satelliitin tekniset tiedot		60
Taulukko 5.	Resurs-P-satelliittityypin tekniset tiedot		61
Taulukko 6.	Satelliittien simuloinnissa käytetyt tiedot ja arvot		68
Taulukko 7.	Vuoden 2016 teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet		71
Taulukko 8.	Auringon eri korkeuskulmien tuntimääriä kuukausittain	Liite 1	1
Taulukko 9.	Utön ja Rankin mittauspisteiden auringonpaistetunnit	Liite 2	1
Taulukko 10.	Utön ja Rankin mittauspisteiden pilvisyyden todennäköisyys	Liite 2	2
Taulukko 11.	Venäjän laukaisemat sotilassatelliitit vuodesta 2001 alkaen	Liite 6	2
Taulukko 12.	Tammikuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	3
Taulukko 13.	Helmikuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	6
Taulukko 14.	Maaliskuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	8
Taulukko 15.	Huhtikuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	11
Taulukko 16.	Toukokuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	13
Taulukko 17.	Kesäkuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	15
Taulukko 18.	Heinäkuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	17
Taulukko 19.	Elokuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	19
Taulukko 20.	Syyskuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	21
Taulukko 21.	Lokakuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	23
Taulukko 22.	Marraskuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	25
Taulukko 22.	Joulukuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet	Liite 7	27

LYHENTEET JA KÄSITTEET

AGI	Analytical Graphics, Inc. STK-ohjelmiston valmistaja.
Apogeuum	Kiertoradan kohta, jossa satelliitti on kauimpana radan keskipisteestä
ASAT	(Anti-Satellite) Satelliittien tuhoamiseen tarkoitettu asejärjestelmä.
COSPAR ID	(Committee on Space Research International Designator) Satelliittien kansainvälinen nimeämistapa.
DARPA	(Defense Advanced Research Projects Agency) Yhdysvaltain asevoimien tutkimusorganisaatio.
ELINT	(Electronic Intelligence) Tarkoitetaan yleensä tutkataajusalueen tai radiotaajuuksien tiedustelua.
EOS	(Electro-optical sensor) Elektro-optinen sensori.
ESA	(European Space Agency) Euroopan avaruusjärjestö.
FTP	(File Transfer Protocol) Tiedonsiirtomenetelmä tietokoneiden välillä.
GEO	(Geostationary Orbit) Geostationaarinen kierto- rata. Satelliitti pysyy jatkuvasti saman maantieteellisen paikan yläpuolella päiväntasaajalla.
GLONASS	(Globalnaja Nabigatsionnaja Sputnikovaja Sisterna) Venäläinen satelliittipaikannusjärjestelmä, vrt. GPS
GSD	(Ground Sample Distance) Kaukokartoituksessa (tai kuvaustiedustelussa) käytetty termi kahden pikselin keskikohtien välisestä etäisyydestä maanpinnalla.
HEO	(Highly Elliptical Orbit) Satelliitin hyvin elliptinen kierto- rata. Poikkeaa muista yleisistä kierto- rata tyypeistä siten, ettei se ole ympyrän muotoinen.
Inklinaatio	Satelliitin ratatason kulma suhteessa päiväntasaajan tasoon.
Konstellaatio	Useasta satelliitista koostuva satelliitijärjestelmä.
Kosmos	Venäläisten sotilassatelliittien nimeämiskäytäntö. Etuliitteen perään lisätään satelliitin järjestysnumero.
LEO	(Low Earth Orbit) Satelliitin matala kierto- rata. Radan korkeus yleensä alle 1000 km Maan pinnasta.

LOMO	(Leningradskoye Optiko Mechanicheskoye Obyedinenie) Venäläinen muun muassa optiikkaa valmistava yhtiö. Mahdollisesti valmistanut Persona- ja Bars-M-satelliittien optiikan.
MATINE	Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta. Toimii puolustusministeriön hallinnonalalla sotilaallista maanpuolustusta tukevan tutkimuksen sekä turvallisuustutkimuksen edistämiseksi.
MEO	(Medium Earth Orbit) Satelliitin keskikorkea kiertorata. Radan korkeus yleensä 10000–20000 Maan pinnasta.
MS	(Multispectral) Multispektraalinen eli monikanavainen kuva. Sisältää yleensä alle parikymmentä kanavaa.
MWIR	(Mid-wavelength Infrared) Keskiaaltoinfrapuna-alue, aallopituus 3,0–5,0 μm .
Nadiiri	Suoraan satelliitin alapouolella oleva piste Maan pinnalla.
NASA	(National Aeronautics and Space Administration). Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruusjärjestö.
NATO	(North Atlantic Treaty Organization) Pohjois-Atlantin liitto. Poliittinen ja sotilaallinen liittouma.
NIR	(Near-Infrared) Lähi-infrapuna-alue, aallonpituus 0,7–1,1 μm .
NPO Mašinostrojenija	Venäläinen ohjusten, raketien ja satelliittien suunnitelutoimisto. Kondor-satelliitin valmistaja.
NPO Vega	Venäläinen tutkiin ja valvontajärjestelmiin erikoistunut suunnitelutoimisto. Valmistanut SAR-tutkan Kondor-E-satelliittiin.
NPP VNIEM	Venäläinen avaruusteknologiayritys. Kanopus-V-satelliittityypin valmistaja.
PAN	(Panchromatic) Pankromaattinen eli yksikanavainen kuva.
Perigeum	Kiertoradan kohta, jossa satelliitti on lähimpänä radan keskipistettä
Progradinen	Satelliitti kiertää samaan suuntaan kuin Maa pyörii akselinsa ympäri.
RCS	(Radar cross-section) Tutkapoikkipinta-ala.
Retrogradinen	Satelliitti kiertää eri suuntaan kuin Maa pyörii akselinsa ympäri.
Roskosmos	Venäjän avaruusjärjestö.

SAR	(Synthetic Aperture Radar) Synteettisen apertuurin tutka. Tutkan resoluutiota parannetaan kasvattamalla antenniryhmän kokoa keinotekoisesti alustan nopeusvektorin suunnassa.
ScanSAR	Yksi SAR-tutkan toimintamuodoista. Tällä kyetään kuvaamaan suurin kuva-ala, mutta samalla huonoin resoluutio.
Spotlight	Yksi SAR-tutkan toimintamuodoista. Tällä kyetään kuvaamaan pienin kuva-ala, mutta saavutetaan korkein resoluutio.
SSO	(Sun-synchronous orbit) Aurinkosynkroninen rata. Ratataso kääntyy noin asteen idemmäksi joka päivä, jolloin ratataso näyttää pysyvän auringon suhteen paikoillaan.
STANAG	(Standardisation Agreement) NATO:n käyttämä vakiointisopimus, jolla yhdenmukaistetaan jäsenmaiden teknisiä termejä ja käytäntöjä.
STK	(Systems Tool Kit) AGI:n valmistama simulointiohjelmisto, jota käytettiin tutkimuksessa satelliittien kiertoratojen simulointiin.
Stripmap	Yksi SAR-tutkan toimintamuodoista. Antennin keila osoittaa jatkuvasti suoraan sivulle. Resoluution ja kuva-alan leveyden osalta spotlightin ja scanSARin välistä.
SWIR	(Short-wavelength Infrared) Lyhytaaltoinfrapuna-alue, aallonpituus 1,1–3,0 μm .
TIR	(Thermal Infrared) Terminen infrapuna, aallonpituus 3–5 ja 8–14 μm .
TsNIIMASH	Venäjän avaruusjärjestön alainen tutkimusinstituutti, joka vastaa muun muassa satelliittien ratojen seurannasta ja ylläpidosta.
TsSKB-Progress	Venäjän avaruusjärjestön alainen valtionyritys. Resurs-P-, Persona- ja Bars-M-satelliittien valmistaja.

MERKINNÄT

a	Ellipsin isoakselin puolikas
c	Valonnopeus (noin $300\,000\text{ m/s}$)
d	Sensorielementin koko tai elementtien väliin jäävä tila [m]
D	Optiikan polttoväli [m] tai SAR-tutkan antenninen koko [m]
d_a	SAR-tutkan poikittaisresoluutio [m]
d_r	SAR-tutkan etäisyysresoluutio [m]
e	Ellipsin eksentrisyys
ϕ	Koordinaatteihin liitettyä yleensä leveyspiiri [°]
G	Gravitaatiovakio ($6.67408 \times 10^{-11}\text{ m}^3\text{ kg}^{-1}\text{ s}^{-2}$)
GSD_d	Kuvailmaisen erottelukyky
GSD_D	Optiikan erottelukyky
GSD_{xy}	Erottelukyky, jossa on huomioitu kuvauskulmasta aiheutuvat vääristymät
h	Satelliitin korkeus Maan pinnasta ympyräradalla
h_a	Apogeumin korkeus Maan pinnasta
h_p	Perigeumin korkeus Maan pinnasta
i	Inklinaatiokulma [°]
J_2	Maan litistyneisyydestä johtuva vakio ($0,001081874$)
λ	Koordinaatteihin liitettyä yleensä pituuspiiri [°]
M	Satelliitin kiertämän keskuskappaleen massa [kg]
M_E	Maan massa ($5,97219 \times 10^{24}\text{ kg}$)
r	Satelliitin etäisyys keskuskappaleen keskipisteestä
R_E	Maan säde (6371000 m)
r_a	Apogeumin etäisyys kiertoradan keskuskappaleen keskipisteestä
r_p	Perigeumin etäisyys kiertoradan keskuskappaleen keskipisteestä
S_w	Kuva-alan leveys [m]
T	Satelliitin ratakierroksen kesto [s]
τ	Tutkan pulssinpituus [s]

UHKA AVARUUDESTA – SATELLIITTIENTEN KYKY JA RAJOITTEET HAVAITA ERILAISIA KOHTEITA SUOMEN OLOSUHTEISSA

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen aihe ja tutkimusongelmat

Venäjän satelliittitiedustelun suorituskyky heikentyi huomattavasti Neuvostoliiton hajoamisen jälkeen. Nyt suorituskykyä on ryhdytty kehittämään ja viimeisiä optisia kuvaussatelliitteja korvataan elektro-optisilla. Venäjä on kehittämässä myös tutkakuvaussatelliitteja perinteisten optisen alueen satelliittien lisäksi. Tässä tutkimuksessa luodaan katsauksen Venäjän nykyiseen satelliittikalustoon ja arvioidaan tulevia satelliitteja noin 5–10 vuoden aikajänteellä.

Tämän tutkimuksen aiheena on Venäjän tiedustelusatelliittien kyky havaita Merivoimien taistelualuksia saaristosta ja siitä aiheutuva uhka niiden maalittamiselle. Uhalla tarkoitetaan satelliittien muodostamaa tilannekuvaa alusten sijainnista, jota voidaan käyttää alusten maalittamiseen ja asevaikutuksen käyttämiseen niitä vastaan.

Näkökulma tutkimusaiheeseen on tekninen. Tutkimuksessa esitellään yleisesti satelliittien ratamekaniikkaan vaikuttavat tekijät, erilaiset tiedustelusatelliittityypit sekä kuvien arvioinnissa käytetyt yleisimmät menetelmät ja kriteerit. Tarkemmin tutkimuksessa esitellään Venäjän käytössä olevat satelliitit ja arviot tulevaisuudessa laukaistavista satelliiteista. Venäjän käytössä olevista satelliiteista huomioidaan sekä sotilas- että kaupalliset satelliitit. Näiden perusteella arvioidaan Venäjän kykyä maalittaa aluksia saaristo-olosuhteissa.

Varsinaiseksi tutkimusongelmaksi nousee: *Mikä on Venäjän satelliittitiedustelun uhka Merivoimien taistelualuksille?*

Tutkimusaihe on syntynyt Merivoimien aloitteesta. Venäjän kyky käyttää satelliitteja hyväksi tiedustelussa ja sen reunaehdot kiinnostavat Merivoimia, joten Merivoimat esitti aiheen lisäämistä Maanpuolustuskorkeakoulun Sotatekniikan laitoksen tutkimusluetteloon. Tämän lisäksi Merivoimat esitti Sotataidon laitokselle kiinnostukseksensa eri suojapaikkataktiikoiden käytettävyyteen nykypäivän tiedustelua vastaan.

Tämä tutkimus on yhdistelmä molempia edellä mainituista aiheista. Näiden lisäksi aihe on kiinnostava myös taistelualuksilla palvelevan henkilöstön näkökulmasta. Tiedustelusatelliittien aiheuttamasta uhasta taistelualuksille kriisin aikana keskustellaan usein myös taistelualuksilla palvelevan henkilöstön keskuudessa. Keskusteluissa satelliittien tuottama maali-tuskyky täsmäasejärjestelmille koetaan uhkana aluksille. Keskeiseksi kysymykseksi nousee yleensä se, pitääkö aluksen olla jatkuvasti liikkeessä selviytyäkseen vai voiko se tukeutua tietyn ajaksi myös saareen tai ankkuriin huoltamaan ja täydentämään. Varsinaista faktatietoa keskustelun pohjaksi on saatavilla yleensä hyvin vähän, joten keskustelua ohjaavat eri henkilöiden mielikuvat.

Myös Maavoimat oli esittänyt Sotatekniikan laitoksen tutkimusluetteloon kahta tiedustelusatelliitteihin liittyvää tutkimusaihetta. Niissä esitettiin selvitettäväksi vastauksia muun muassa seuraaviin kysymyksiin:

- Mitkä ovat nykyisin käytössä olevat sensorit ja niiden suorituskyky?
- Mitkä ovat 2020-luvun alun sensorit ja niiden arvioitu suorituskyky?
- Mikä olosuhteet vaikeuttavat sensorien toimintaa?
- Missä syklissä satelliitit tuottavat tietoa?
- Millaisissa olosuhteissa satelliittien toimintakyky on alentunut?
- Millaiset kohteet erottuvat eri sensoreilla?

Tässä tutkimuksessa vastataan myös näihin kysymyksiin kohtalaisen kattavasti, vaikkain lähinnä Merivoimien näkökulmasta. Lisäksi tulee todeta, että satelliittien osalta arvioidaan vain Venäjän satelliitteja.

Tutkimuksessa selvitetään satelliittien fysikaalisia rajoituksia ja Venäjän resurssien tuomia rajoituksia satelliittien käytölle. Tavoitteena on antaa Merivoimille arvioita turvallisen tukeutumisan mahdollisesta kestosta ja toimenpidesuosituksia uhan vähentämiseksi. Pääasiallinen pyrkimys on kuvata satelliittitiedustelun kykyä ja sen rajoituksia. Erilaiset tukeutumis- ja suo-japaikkataktiikat vaikuttavat merkittävästi maalittamisen uhkaan saaristossa, joten myös niiden käytettävyyttä eri tilanteissa arvioidaan hieman.

Tutkimusongelman ratkaisemiseksi muodostettiin kolme tutkimuskysymystä:

- *Miten satelliittien ratamekaniikka vaikuttaa satelliitin käytettävyyteen Suomen rannikolla?*
- *Miten satelliittien sensorityyppi vaikuttaa satelliitin käytettävyyteen Suomen olosuhteissa?*
- *Mikä on Venäjän kyky tiedustella aluskohteita Suomen rannikolla satelliittien avulla?*

1.2 Tutkimuksen rakenne ja tutkimusmenetelmät

Johdannon jälkeen toisessa luvussa käsitellään satelliittien ratamekaniikkaa. Ratamekaniikalla on merkittävä vaikutus satelliittien alueelliseen ja ajalliseen kattavuuteen sekä satelliitin elinkaaren pituuteen. Tämä luku luo perustan satelliittien ajallisen suorituskyvyn ymmärtämiselle. Kolmannessa luvussa esitellään yleisesti eri tiedustelusatelliittityypit, niiden vahvuudet ja heikkoudet sekä käytettävyys erilaisissa olosuhteissa. Luku kuvaa eri satelliittityyppien käytettävyyttä Suomen olosuhteissa. Neljäs luku käsittelee kuvan arvioinnissa ja tulkinnessa käytettyjä menetelmiä sekä alusten havaitsemiseen käytettyjä kriteerejä kuvan tarkkuuden suhteen. Tällä luodaan perusta alusten havaitsemiselle saaristossa. Viidennessä luvussa käsitellään Venäjän tämänhetkisiä kaupallisia ja sotilassatelliitteja sekä arvioita tulevaisuudesta. Venäjän kyky suorittaa satelliittitiedustelua perustuu näihin tietoihin. Luvuissa 2–5 tutkimusmenetelmänä on käytetty kirjallisuustutkimusta. Kuudennessa luvussa pyritään määrittelemään satelliittien mahdollinen kuvaustiheys ja siitä mahdollisesti muodostuva uhka. Tässä tutkimusmenetelmänä on käytetty simulointia.

Tutkimusmenetelmien osalta tutkimus voidaan jakaa kahteen osioon: *kirjallisuustutkimukseen ja simulointiin / matemaattiseen analyysiin*.

Kirjallisuustutkimuksessa olemassa olevaa tietoa etsitään, analysoidaan, luokitellaan ja käytetään oman työn pohjana. Kirjallisuustutkimusta voidaan luonnehtia perusmenetelmäksi, joka tyypillisesti antaa teoriapohjan tutkittavalle ilmiölle Sotatekniikan tutkielmissa. Kirjallisuuteen perustuvat osuudet voidaan luokitella kirjallisuusselvitykseen ja survey-tyyppiseen kirjallisuustutkimukseen. Kirjallisuusselvitys on esitys työn kannalta olennaisesta asiasta ja muodoltaan referaatti useasta lähteestä. Survey-kirjallisuustutkimuksessa lähteet ovat luokiteltu ja niistä muodostetaan perusteellinen analyysiraportti. Olennaisin ero menetelmien välillä on se, että survey-kirjallisuustutkimus sisältää tutkijan omia ajatuksia ja johtopäätöksiä, ollen siten jo itsessään aito tutkimusraportti. [1]

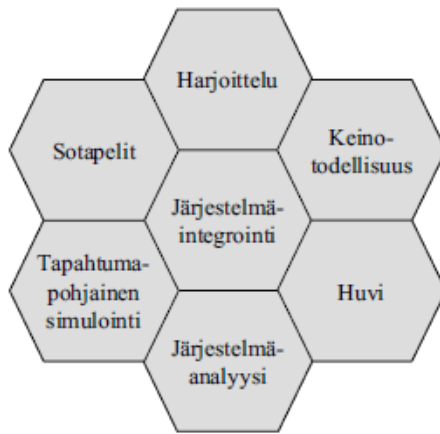
Kirjallisuusselvitys valottaa tutkimuksen teoreettiset lähtökohdat keskittyen tutkimusongelman kannalta olennaiseen kirjallisuuteen. Sen tarkoituksena on näyttää mistä näkökulmista ja miten asiaa on jo aiemmin tutkittu. Lisäksi halutaan osoittaa, miten suunnitteilla oleva tutkimus liittyy aiempiin tutkimuksiin. Aiempi tieto on eriteltävä ja arvioitava huolellisesti, koska tutkielman johtopäätöksissä tuoreen tutkimuksen tulokset kytketään tähän aiempaan tietoon.

Aiemman tiedon arviointia ja erittelyä ei tule paisuttaa liikaa, mutta samalla taustojen ja tehtävän tutkimuksen arvioimiseksi tarvittavien seikkojen on käytävä ilmi. [2]

Tässä tutkimuksessa kirjallisuustutkimusta käytetään edellytyksenä simuloinnin suorittamiselle ja tulosten ymmärtämiselle. Lukujen kaksi ja kolme teoria pohjautuvat fysiikan lakeihin ja sensorien yleisesti tunnettuihin ominaisuuksiin. Näiden lukujen osalta lähdekirjallisuutta voidaan pitää varsin luotettavana. Luvussa neljä esitellyt kriteerit kuvan tunnistamiseen vaadittavasta tarkkuudesta ovat olleet käytössä jo pitkään, joten niitäkin voidaan pitää kohtalaisen luotettavina vertailukohtina. Edellä mainittujen lukujen pääasiallinen tarkoitus on toimia tutkimuksen teoreettisena perustana, kuten Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa -julkaisussa todetaan.

Lähteiden osalta lukua viisi voidaan pitää haasteellisimpana. Tämä johtuu siitä, että Venäjän tiedustelusatelliittien suorituskky ei ole julkista tietoa ja internet-lähteistä löytyvä tieto on vain arvio todellisesta kyvystä. Siihen tulee siis suhtautua kriittisesti. Venäjän kaupallista satelliiteista annetut tiedot ovat todennäköisesti varsin totuudenmukaisia, mutta varmuutta tästäkään ei ole. Yhdysvaltojen poistettua rajoitukset kaupallisten satelliittikuvien tarkkuudesta, on uusimpien kaupallisten satelliittien suorituskky todennäköisesti huomattavasti lähempänä sotilassatelliitteja kuin aikaisemmin. Näitä voidaan käyttää apuna myös sotilassatelliittien kykyä arvioidessa. Tietoja satelliittien määrästä ja rataparametreista voidaan pitää varsin luotettavina. Näiden lähteenä on käytetty Yhdysvaltain asevoimien ylläpitämää julkista luetteloa satelliittien radoista (liite 5). Luku vahvistaa tutkielman teoreettista pohjaa tutkimukselle ja luo lisäksi perustan simuloinnille selvittämällä Venäjän käytössä olevat satelliitit, niiden rataparametrit ja arvion sensorien suorituskkyistä.

Simulointi on yleisimpiä tekniikan tutkimusmenetelmiä. Siinä tutkittava järjestelmä, laite, menetelmä tai algoritmi mallinnetaan sopivalla tarkkuudella ja malli toteutetaan simulaattorilla. Simulointia käytettäessä tutkimusraportissa tulee esittää simulointimalli ja kuvata käytetyt simulointityövälineet lyhyesti. Lisäksi tulee esittää simulointitapaukset, simulointiajat ym. esimerkiksi taulukkoina sekä simulaation tulokset mahdollisimman paljon informaatiota sisältävinä käyrinä. [1] Simulointi-termillä tarkoitetaan jäljittelyä, mallintamista ja asioiden ratkaisemista virtuaalisessa ympäristössä [3]. Simulointi voidaan jakaa karkeasti seitsemään ryhmään käyttötavan perusteella (kuva 1) [3]. Tilannetta, jota simuloinnissa tutkitaan, kutsutaan skenaarioksi ja simuloinnin tulokset ovat aina tähän tilanteeseen sidoksissa [4]. Mikäli skenaariosta muutetaan jotain tekijää, myös tulokset muuttuvat.



Kuva 1. Simuloinnin käyttötavat [3]

Tässä tutkimuksessa tehty simulointi on lähinnä järjestelmäanalyysia. Järjestelmäanalyysissa pyritään selvittämään jonkin järjestelmän tai laitteen toimintaa simuloinnin avulla. Nämä simulaatiot ovat yleensä jatkuva-aikaisia malleja, joita käytetään jatkuvassa muutoksessa olevien prosessien kuvaamiseen. Ympäristö ja vaikutukset ovat yleensä simuloituja, mutta myös toimija, eli itse järjestelmä, voi olla simuloitu. [3]

Simulointimallit voidaan jakaa mallinnustekniikan perusteella deterministisiin ja stokastisiin simulointeihin. Mikäli simulointi ei sisällä satunnaistekijöitä, kutsutaan sitä deterministiseksi eli määrätynksi. Deterministisessä simuloinnissa tapahtumat ja niiden lopputulokset voidaan määrittellä alkuarvojen perusteella. Tulokset eivät siis muutu, vaikka simulointiajo uusittaisiin. Mikäli simulointi sisältää satunnaistekijöitä, kutsutaan sitä stokastiseksi eli tilastolliseksi. Stokastisessa simuloinnissa tulokset poikkeavat toisistaan, kun verrataan samoilla lähtöarvoilla ajettuja simulointeja keskenään. [3]

Tutkimuksessa on simuloitu ympäristö (Maa kiertoratoineen ja auringon korkeus), vaikutukset (sensorin kattavuus ajanhetkenä) ja toimija (satelliitin rataparametrit ja sensorin suorituskyky). Satelliittien radoissa eikä sensorien suorituskyvyissä ole muuttujia simulointikertojen välillä. Simulointimallin osalta tutkimus on lähellä determinististä. Sääolosuhteet ovat kuitenkin muuttuva tilastollinen tekijä, joka vaikuttavat sensorin suorituskykyyn. Sääolosuhteiden vaikutus huomioidaan kiertoratojen simuloinnin jälkeen simuloimalla erikseen sääolosuhteiden vaikutukset tilastollisiin todennäköisyyksiin perustuen. Tutkimuksen tuloksissa ovat näkyvissä teoreettiset simulointikerroista riippumattomat kuvausmahdollisuudet sekä sääolosuhteista aiheutuvat todennäköiset kuvausmahdollisuudet. Tutkimuksessa käytetään siis sekä determinististä että stokastista simulointia.

Simulaatioita suunniteltaessa on tärkeää kyetä määrittämään tutkittavat muuttujat ja mahdolliset oletukset mahdollisimman realistisesti, muutoin simuloinnin tulokset saattavat vääristyä [4]. Simuloinnin tuloksia tarkasteltaessa on huomioitava simuloinnissa käytettyjen arvojen mahdollinen poikkeama todellisista arvoista. Menetelmän luotettavuus riippuu siis järjestelmien arvojen oikeellisuudesta. Mikäli simuloinnissa käytetyt arvot poikkeavat todellisuudesta merkittävästi, ei simulaation tuloksiin voi luottaa. Aiemmin kuvatun kirjallisuustutkimuksen rooli korostuu juuri oikeiden suoritusarvojen määrittämisessä.

Satelliittien kiertoratojen simulointiin tutkimuksessa käytettiin Analytical Graphics Incorporationin (AGI) valmistamaa Systems Tool Kit (STK) 11 -ohjelmistoa. STK on laajassa käytössä maailmalla ja sitä käytetään muun muassa ilma-alusten, satelliittien, ajoneuvojen sekä niiden sensorien suorituskyvyn simulointiin [5]. Ohjelmalla kyetään mallintamaan luotettavasti satelliittien radat Maan ympäri ja tarkastelemaan satelliittien toistojaksoa Suomen alueella. Simuloinnista saadut tulokset vietiin Microsoft Excel-ohjelmistoon, jossa niille suoritettiin jatkosimulointi sääolosuhteiden vaikutuksesta kuvausmahdollisuuksiin.

Luvun 6 tulokset perustuvat simulointeihin. Aikaisemmat luvut muodostavat perustan simulaatiossa käytettävän skenaarion lähtö- ja suoritusarvoille. Simuloinnin tulokset ovat keskeisiä tutkimusongelmaan vastatessa.

1.3 Työn keskeiset rajaukset ja aikaisempi tutkimus

Tutkimus on rajattu käsittelemään alusten maalittamista saaristossa, koska taistelualukset eivät käytännössä poistu saaristosta ilman pakottavaa syytä sen jälkeen, kun asevaikutuksen uhka on olemassa. Tutkimuksen kohdealueena on Etelä-Suomi, joka on pääsääntöisesti myös Merivoimien taistelualusten toiminta-alue. Toimintaympäristönä on siis Suomen etelärannikon saaristo.

Tutkimuksessa käsitellään kuvan tarkkuuteen ja analysointiin liittyvät yleiset periaatteet, mutta pääpaino on satelliittien ajallisilla rajoituksilla. Venäjän tiedustelusatelliittien määrästä johtuen niiden ajallinen kattavuus on selkeästi merkittävin tekijä alusten havaitsemiselle. Tutkimuksessa tiedustelusatelliitit rajoitetaan käsittämään kuvaustiedustelusatelliitteja. Signaalitiedustelusatelliitteja ei käsitellä, koska niiden suorittaman tiedustelun alus kykenee väistämään rajoittamalla omia lähetyksiään sähkömagneettisessa spektrissä.

Maanpuolustuskorkeakoululla aikaisemmin tehdyt tiedustelusatelliitteihin liittyvät opinnäytetyöt on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. MPKK:lla tehdyt tutkimuksen aiheeseen liittyvät opinnäytetyöt

Tutkimuksen otsikko	Tekijä	Tutkinto
Länsimaisten ja venäläisten sotilassatelliittien yleinen rakenne ja suorituskyky	Saku Lipsanen	SK
Satelliittitiedustelu - kuvaussatelliittien kehitys	Pauli Vallius	SK
Satelliittien hyödyntäminen merialueen valvonnassa	Markus Halme	SK
Satelliittien hyödyntäminen merialueen valvonnassa	Pessi Pursiainen	SK
Venäläisen satelliittitiedustelun suorituskyky	Sami Gustafsson	SK
Lentotukikohdan kuvaustiedustelu tiedustelusatelliitilla ja lentokoneella	Saku Lipsanen	SM
Kaupallisten kaukokartoitussatelliittien käyttö kuvaustiedustelussa	Tuomo Rusila	UPS
SAR-satelliittien hyödyntäminen merivalvonnassa	Jarmo Säkkinen	EUK
SAR-satelliitin sotilaalliset käyttömahdollisuudet Suomessa	Pasi Tolvanen	EUK

Kaikissa Merivoimien näkökulmasta tehdyissä aiemmissa tutkimuksissa on käsitelty aihetta oman valvontakyvyn kannalta kehittämisen kannalta, eikä vihollisen suorittaman maalittamisen. Käytännössä kaikissa aiemmissa Maanpuolustuskorkeakoulussa tehdyissä tutkimuksissa on käytetty tutkimusmenetelmänä ainoastaan kirjallisuustutkimusta tai haastattelua. Lipsasen pro gradu -tutkimuksessa on käytetty myös matemaattista analyysia ja vertailua, mutta valitettavasti tiedustelusatelliittien kuvaustiheyden osalta laskut ovat virheellisiä. Aiemmissa Venäjää käsittelevissä töissä on keskitytty lähinnä satelliittien yleisten ominaisuuksien esittelyyn.

Maanpuolustuskorkeakoulussa tehtyjen tutkimusten lisäksi aihetta on tutkittu sotilaallisesta näkökulmasta Maanpuolustuksen tieteellisen neuvottelukunnan (MATINE) toimesta. Nämä tutkimukset ovat keskittyneet pääsääntöisesti satelliittien ja niiden sensorien teknisiin ominaisuuksiin tai kehitysnäkymiin. MATINE ei ole tutkinut satelliitteja kuitenkaan Venäjän tai kohteiden maalittamisen näkökulmasta. Muissa Suomen yliopistoissa on tehty lukuisia satelliitteihin liittyviä tutkimuksia. Ne ovat olleet pääsääntöisesti joko teknisiä tutkimuksia satelliittien järjestelmistä tai liittyneet kaukokartoituksessa käytettäviin kuvaussatelliitteihin. Niissä ei ole kuitenkaan ollut sotilaallista näkökulmaa. Poikkeuksena tulee mainita Juha Pikkaraisen Jyväskylän yliopistossa tekemä pro gradu -tutkimus, joka oli tehty MATINE:n toimeksiannosta ja löytyy täten myös heidän julkaisusarjoistaan.

Puolustusvoimien Tutkimuslaitos on tutkinut aihetta todennäköisesti sekä Venäjän että maallittamisen näkökulmista. Näitä tutkimuksia ei kuitenkaan löytynyt Puolustusvoimien Turvallisuusverkko (TUVE)-ympäristöstä hakemalla. On mahdollista, että tehtyjen tutkimusten tietoturvaluokka on TUVE-ympäristöä korkeampi. Merivoimissa on aikaisemmin tutkittu alusten havaitsemista saaristosta yksittäisten satelliittikuvien avulla, mutta ei varsinaisesti kuvausmahdollisuuksien määrää tai tiheyttä.

Yhteenvedona aiemmista tutkimuksista voidaan todeta, että tämän tyyppistä uhka-arviota simuloimalla ei ole tehty aikaisemmin Suomessa ainakaan tietoturvaluokaltaan julkisena työnä.

2. SATELLIITTIIEN YLEISET OMINAISUUDET

Satelliitti on yleisnimitys taivaankappaletta kiertävälle pienemmälle kappaleelle. Satelliitti voi olla luonnollinen, esimerkiksi jonkun planeetan kuu tai keinotekoinen, kuten maapallon ympärille eri tarkoituksia varten ihmisten lähettämät satelliitit. Tässä tutkimuksessa sanalla satelliitti tarkoitetaan aina keinotekoisia satelliitteja.

Ensimmäinen keinotekoinen satelliitti oli Neuvostoliiton vuonna 1957 laukaisema Sputnik [6]. Tällä hetkellä toimivia satelliitteja on noin 800 [7]. Maan kiertoradoilla on noin 22000 yli 10cm kokoista kappaletta, joista suuri osa on vanhoista satelliiteista peräisin olevaa avaruusromua [7; 8]. Pienempää avaruusjätettä (1–10 cm), jota ei kyetä seuraamaan, arvioidaan olevan eri kiertoradoilla jopa 300 000 kappaletta [7].

Satelliittien kehittyessä yhdeksi tärkeäksi kysymykseksi muodostui, että ylettyykö kansallinen ilmatila ja sen hallinta myös avaruuteen saakka. Kysymys sai sellaisen tulkinnan, ettei kansallinen ilmatila ei jatku avaruuteen saakka. Seuraavaksi haasteeksi muodostui kuitenkin määrittäminen siitä, että missä ilmatila loppuu ja mistä avaruus alkaa. Asiaa käsiteltiin muun muassa Yhdistyneiden Kansakuntien eri kokouksissa ja Neuvostoliitto esitti rajaksi noin 100–120 kilometriä merenpinnan yläpuolella. Suurin osa valtuuskunnista hyväksyi ehdotuksen, mutta mitään virallista rajaa avaruudelle ei ole vielä tänä päivänäkään vahvistettu. [9; 10] Tiedustelusatelliitin lennättäminen vieraan valtion yli on siis täysin sallittua [9; 10]

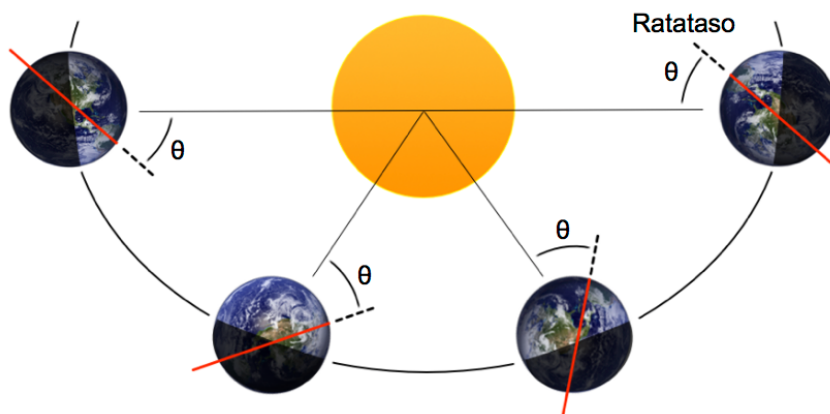
2.1 Satelliittien rata

Satelliitin rataa sen keskuskappaleen ympäri kutsutaan kiertoradaksi. Satelliittien kiertorata riippuu yleensä sen käyttötarkoituksesta. Yleisimmät käytetyt kiertoradat ovat keskikorkea kiertorata, matala kiertorata ja geostationaarinen kiertorata. Näiden lisäksi yksi yleisistä kiertoratatyypeistä on hyvin elliptinen kiertorata [11]. Nämä on havainnollistettu kuvassa 3.

Matalalla kiertoradalla (Low Earth Orbit, LEO) olevat satelliitit kiertävät maapalloa noin 160–1000 kilometrin korkeudella [11; 12]. Käytössä olevista satelliiteista noin puolet ovat LEO-radoilla [8]. Matalasta kiertoradasta johtuen satelliittien kiertoaika on suhteellisen lyhyt ja signaalien vaimeneminen vähäistä. Signaalin vaimeneminen on vähäistä, joten kiertorata on sopiva muun muassa viestintäsatelliiteille. Vähäisestä vaimenemisesta johtuen myös satelliiteilta vaadittu lähetysteho on pienempi. Tästä johtuen kiertoradalla voidaan käyttää fyysisesti pienempiä satelliitteja, joiden rakentaminen on edullisempaa. Satelliitti kiertää maapallon

matalalla kiertoradalla noin puolessatoista tunnissa eli yksittäinen satelliitti on tietyn paikan päällä vain hyvin lyhyen ajan. Maailmanlaajuisen kattavuuden saavuttamiseksi tarvitaan laaja satelliittiverkosto. [12] LEO-ratojen tärkeimpänä alatyypinä voidaan pitää aurinkosynkronista rataa.

Aurinkosynkronisella (Sun Synchronous Orbit, SSO) radalla tarkoitetaan rataa, jossa satelliitin ratatason pyörimisnopeus on auringon suhteen nolla. Koska Maa kiertää auringon noin 365 päivän kuluessa, on satelliitin ratatason käännättävä noin asteen päivässä itään ($360^\circ / 365 \text{ vrk}$), jolloin satelliitti ylittää saman alueen aina samaan vuorokauden aikaan (kuva 2). Tällöin auringon valon määrä ja kulma ovat kuvattavassa kohteessa samankaltaisia joka päivä ja muutosten seuranta kuvattavalla alueella on helpompaa [13]. Lähes puolet LEO-radoilla olevista satelliiteista kiertävät aurinkosynkronisella radalla [8]. Teoriassa myös MEO-radalla oleva satelliitti voi olla aurinkosynkroninen, mutta käytännössä lähes kaikki aurinkosynkronisilla radoilla olevat satelliitit ovat LEO-radoilla [14]. Suurin osa optisen alueen kuvaussatelliiteista toimii aurinkosynkronisilla radoilla [6].

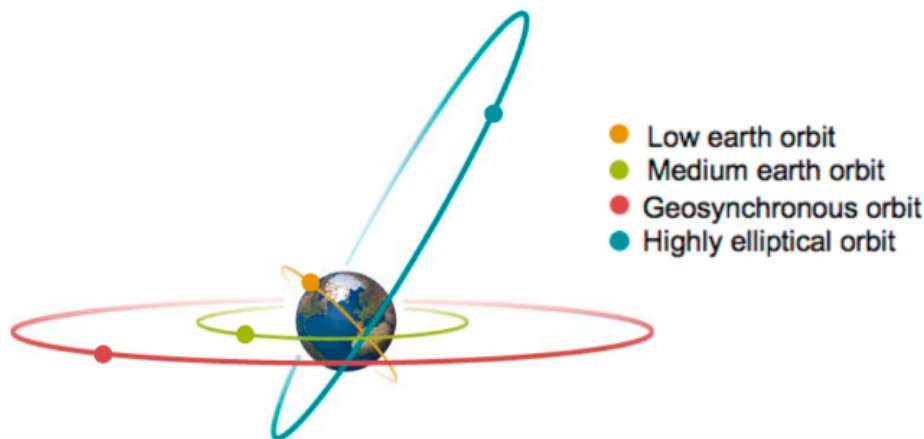


Kuva 2. Aurinkosynkronisen radan ratatason kääntäminen auringon suhteen

Geostationaarisella (Geostationary Orbit, GEO) kiertoradalla tarkoitetaan kiertorataa, jonka kiertoaika vastaa maapallon pyörimisaikaa. Kiertoajan on siis oltava 23 tuntia 56 minuuttia ja korkeuden tämän takia 35678 kilometriä. Lisäksi satelliitin radan täytyy kulkea päiväntasaajan päällä. Tällä saavutetaan se, että satelliitti pysyy jatkuvasti saman maantieteellisen paikan yläpuolella eli satelliitti näyttää maasta katsottuna pysyvän paikallaan. Etuna on suuri peittoalue ja vain kolmella satelliitilla saadaan maailman laajuinen kattavuus 81° leveyspiirien välisellä alueella. [11] Radan haittapuolina on suuresta yhteysvälistä johtuva tiedonsiirtoviive ja etenemisvaimennus sekä satelliitin kiertoradalle toimittamisen korkea hinta. [15]

Keskikorkealla Maan kiertoradalle (Medium Earth Orbit, MEO) olevat satelliitit kiertävät maapalloa noin 10000–20000 kilometrin korkeudessa. Kiertorata on kompromissi LEO- ja GEO-ratojen ominaisuuksista. Satelliittien kiertoaika on kuudesta kahteentoista tuntia. Lähetyskäytävät ovat pidempiä kuin LEO-radalla, joten myös vaimeneminen on suurempaa. Etuna on, että yksittäinen satelliitti on tietyn paikan päällä huomattavasti pidemmän ajan. Kiertorataa käytetään lähinnä viestintä- ja navigointisatelliiteille. [11; 15]

Hyvin elliptinen kiertorata (Highly Elliptical Orbit, HEO) poikkeaa edellisistä siten, että se ei ole ympyrän muotoinen. Satelliitin etäisyys maasta vaihtelee esimerkiksi yhden kierroksen aikana noin 1000 kilometristä jopa noin 40000 kilometriin. [15] HEO-radalla olevalla satelliitilla kyetään tuottamaan suuri peittoalue leveyspiireille, joita geostationaariset satelliitit eivät kata. Kolmella HEO-radalla olevalla satelliitilla saadaan jatkuva kattavuus halutulle alueelle. [11]



Kuva 3. Yleisimmät satelliittien kiertoratatyypit [12]

2.2 Ratakorkeus

Edellisessä alaluvussa käsiteltiin satelliittien yleisimpiä ratatyyppejä. Valittu ratatyyppe vai-
kuttaa ratakorkeuden kautta merkittävästi satelliitin ratanopeuteen ja sitä kautta myös satelliitin
kierroksen keston.

Suurimman osan LEO-radoilla olevista satelliiteista kiertorata on lähes ympyrän muotoinen [14]. Koska etäisyys Maan pintaan pysyy vakiona, pysyy samoin kuvan mittakaava vakiona [16]. Lähes ympyrän muotoisella kiertoradalla tarkoitetaan rataa joka ei ole aivan ympyrä, vaan se on hyvin heikosti elliptinen ja sen eksentrisyys on hyvin lähellä nollaa. Seuraavat kaavat ovat tarkoitettu ympyrän muotoisten kiertoratojen laskemiseen, mutta niitä voidaan käyttää myös tapauksissa, joissa kiertoradan muoto on lähellä ympyrää [17; 18]:

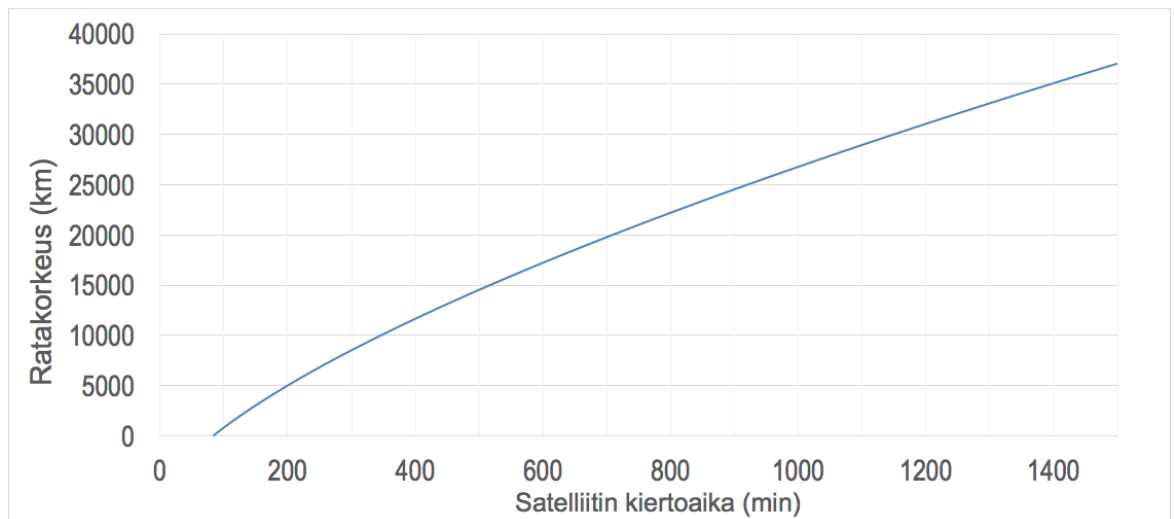
$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} \qquad T = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

G = gravitaatiovakio [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}$]

M = satelliitin kiertämän keskuskappaleen massa [kg]

r = satelliitin etäisyys keskuskappaleen keskipisteestä [m]

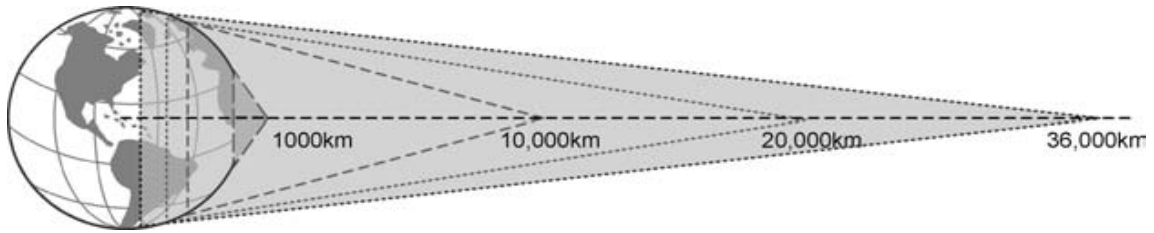
Tuloksena saadaan satelliitin ratanopeus v [m/s] ja yhden ratakiekroksen kesto T [s]. Kuvasta 4 voidaan nähdä satelliitin korkeuden ja yhden ratakiekroksen keston välinen yhteys.



Kuva 4. Ratakorkeuden vaikutus satelliitin ratakiekroksen keston

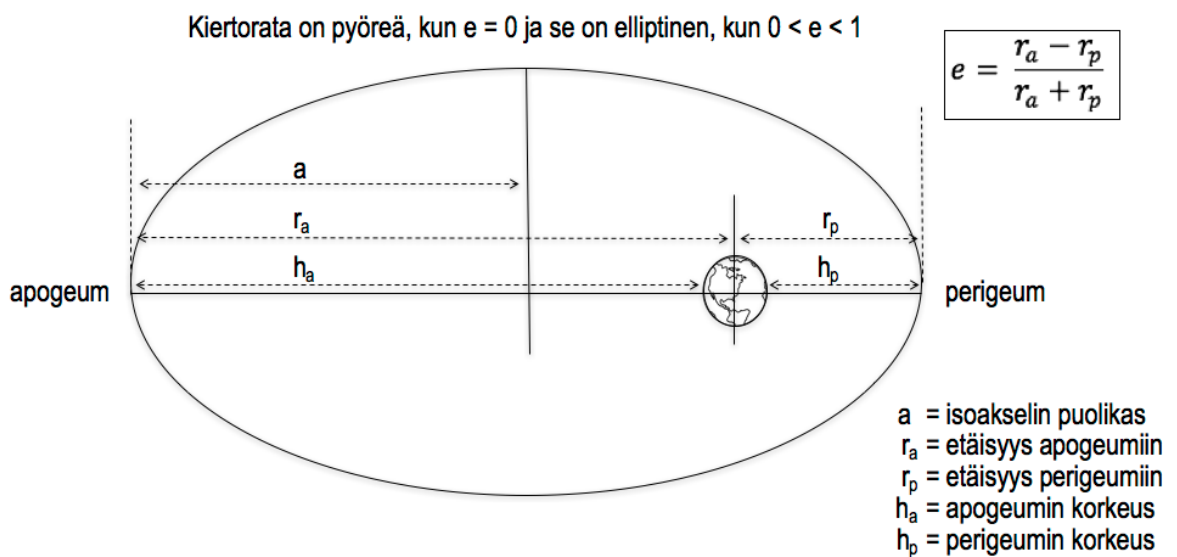
Radan toistojaksoksi kutsutaan aikaa, joka kuluu ennen kuin satelliitti ylittää täsmälleen saman maantieteellisen paikan uudestaan. Toistojaksolla ei kuitenkaan ole suoraa merkitystä kuvauksen toistettavuuteen, koska sitä tärkeämpi arvo on toistoväli. Sillä tarkoitetaan aikaa, joka kuluu kahden samasta paikasta otetun kuvan välillä. Toistovälin pituuden määrittävät satelliitin toistojakson lisäksi sen sensorin kuvausominaisuudet ja kuvattavan alueen leveyspiiri [19]. Toistoväliä käsitellään laajemmin alaluvussa 2.6.

Satelliitin jalanjäljeksi kutsutaan aluetta, jonka se pystyy kerrallaan kattamaan. Jalanjälki riippuu satelliitin ratakorkeudesta, koska matalalla lentävien satelliittien kattavuus on huomattavasti pienempi maapallon kaartumisesta johtuen koska horisontti tulee aiemmin vastaan (kuva 5) [20]. Jalanjäljellä voidaan satelliittityypistä riippuen tarkoittaa esimerkiksi optisen sensorin kattamaa aluetta, tutkan kattamaa aluetta tai viestijärjestelmän kattamaa aluetta. Taajuusalueesta riippuen satelliitin jalanjälki voi ulottua myös hieman optista horisonttia pidemmälle (radiotaajuudet). Esimerkiksi noin 200 km korkeudessa olevan satelliitin sensorin jalanjälki kattaa kerralla vain 1,5 % maapallon pinta-alasta, kun taas 36000 km korkeudessa oleva satelliitin jalanjälki kattaa 43 % maapallon pinta-alasta [20].



Kuva 5. Satelliitin korkeuden vaikutus sensorin jalanjälkeen [20]

Satelliitin kiertoradan pistettä, joka on lähinnä radan keskipistettä kutsutaan perigeumiksi, ja pistettä, joka on kauimpana radan keskipisteestä apogeumiksi. Mikäli kiertorata on elliptinen, vaihtelee satelliitin ratanopeus etäisyyden muuttuessa. Satelliitin nopeus esimerkiksi hyvin elliptisellä kiertoradalla, jossa apogeumin korkeus on 36000 km ja perigeumin korkeus 1000 km, olisi perigeumissa 10 km/s ja apogeumissa vain 1,5 km/s. [15] Elliptisen kiertoradan tekijät voidaan nähdä kuvasta 6. Kuten aiemmin mainittiin, suurin osa kuvaussatelliiteista kiertää lähes ympyrän muotoisilla kiertoradoilla. Näissä radan elliptisyys on hyvin pieni ja eksentrisyys hyvin lähellä nollaa, eli apogeumin sekä perigeumin korkeudet ovat hyvin lähellä toisiinsa. Täten ratanopeuden vaihtelu on myös hyvin pientä.



Kuva 6. Elliptinen kiertorata

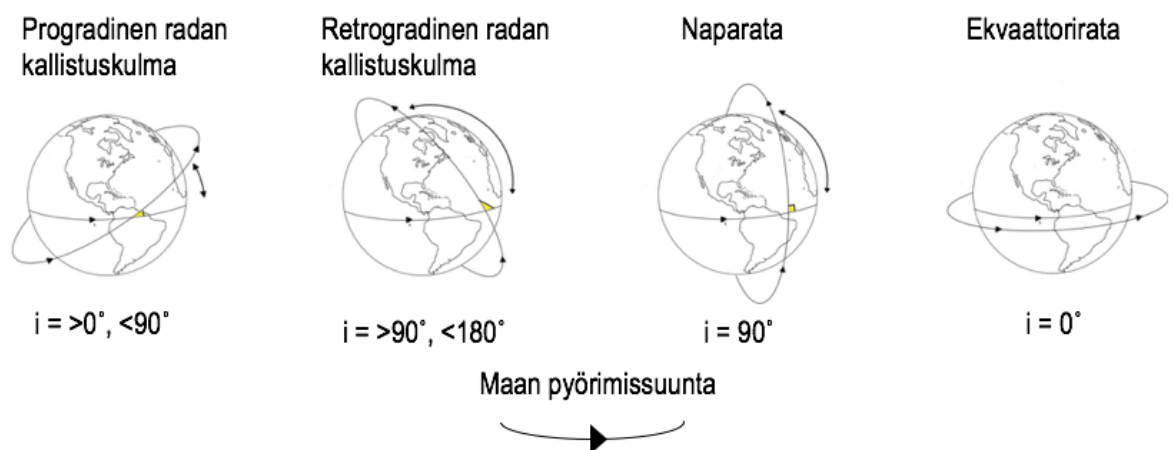
Satelliittien toimittaminen kiertoradalle on kallista ja vaatii suurta lähtönopeutta Maan painovoiman voittamiseksi. Satelliitin paino vaikuttaa merkittävästi siihen mille kiertoradalle se voidaan minkäkin tyyppisellä kantoraketilla sijoittaa. Esimerkiksi kantoraketti, joka kykenee kuljettamaan 15 tonnia painavan satelliitin LEO-radalle, kykenee toimittamaan vain 3 tonnia painavan satelliitin GEO-radalle. Satelliitin toimittaminen LEO-radalle maksaa noin 5500–11000 euroa kiloa kohden. Suurin osa satelliiteista painaa 1000 kilosta 5000 kiloon, joten pelkästään satelliitin toimittaminen kiertoradalle maksaa pienemmällä LEO-rataa käyttävällä

satelliitilla noin 9 miljoonaa euroa kun taas isolla GEO-radalla olevalle satelliitilla jopa 90 miljoonaa euroa. [O'HANLON]

2.3 Radan kallistuskulma

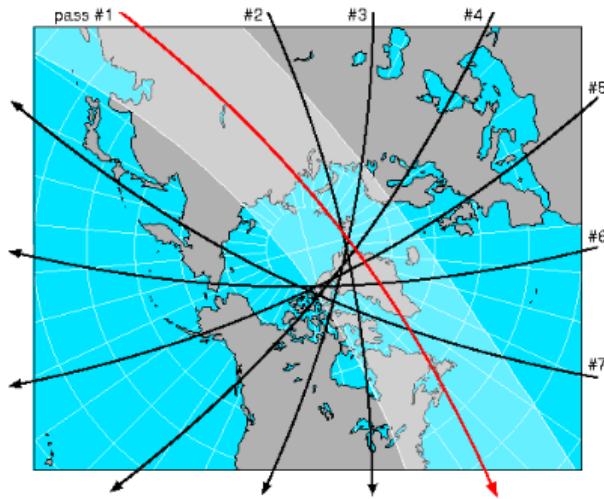
Satelliittien radat voidaan jakaa ratakorkeuden tai -muodon lisäksi myös radan kallistuskulman eli inkliinaation perusteella. Inkliinaatiolla tarkoitetaan kulmaa, jossa ratataso leikkaa päiväntasaajan tason (kuva 7):

- Ekvaattorirata (kallistuskulma 0°), jolloin satelliitti kulkee päiväntasaajan yläpuolisella radalla kulkien aina saman maastonkohdan ylitse. Geostationaaristen satelliittien tulee olla ekvaattoriradalla pysyäkseen jatkuvasti saman maantieteellisen paikan yläpuolella. [14]
- Naparata (kallistus 90°), jolloin satelliitti ylittää kierroksensa aikana molemmat napaluheet. Maan pyörimisestä johtuen naparadalla voidaan kattaa koko maapallon pinta, koska satelliitti ylittää joka kierroksella aina eri pituuspiirillä sijaitsevan kohdan. [14]
- Kallistettu rata on jotain kahden edellisen välistä. Kallistuskulma määrittää suoraan leveyspiirin, jota pohjoisempia ja eteläisempiä alueita satelliitti ei ylitä lentoradallaan eli jos satelliitin inkliinaatio on 50° , niin satelliitti ei ikinä ylitä Suomen aluetta. Mikäli inkliinaatio on alle 90° , kutsutaan rataa progradiseksi ja jos se on yli 90° kutsutaan sitä retrogradiseksi [14]. Progradisella radalla oleva satelliitti kiertää samaan suuntaan kuin Maa pyörii, kun taas retrogradisella radalla oleva satelliitti kiertää päinvastaiseen suuntaan kuin Maa pyörii. Naparata on periaatteessa kallistettu rata 90° kulmalla.



Kuva 7. Kiertoradat satelliitin radan inkliinaation mukaan

Kuvaussatelliitit ovat pääsääntöisesti naparadalla tai hyvin lähellä sitä, koska se mahdollistaa kuvaamisen kaikkialla maapallolla. Napojen läheisyydessä satelliitin rata menee huomattavasti lähempänä edellistä kierrosta, kun päiväntasaajan alueella (kuva 8), samalla satelliitilla saadaan siis huomattavasti enemmän havaintoja kyseiseltä alueelta [21]. Suomi on maantieteellisesti sijainnista johtuen hyvin kuvattavissa.



Kuva 8. Naparadalla olevan satelliitin ratojen päällekkäisyys napa-alueella [22]

Aurinkosynkroninen kiertoradan tapauksessa radan korkeus ja inkliinaatio ovat yhteydessä toisiinsa, koska pysyäkseen aurinkosynkronisella radalla satelliitin radan on täytettävä seuraavat ehdot [18]:

$$-\frac{3}{2} \sqrt{\frac{GM}{a^3}} J_2 \left(\frac{R_e}{a(1-e^2)} \right)^2 \cos i = 0,9856^\circ / \text{vrk}$$

a = ellipsiradan isoakselin puolikas [m]

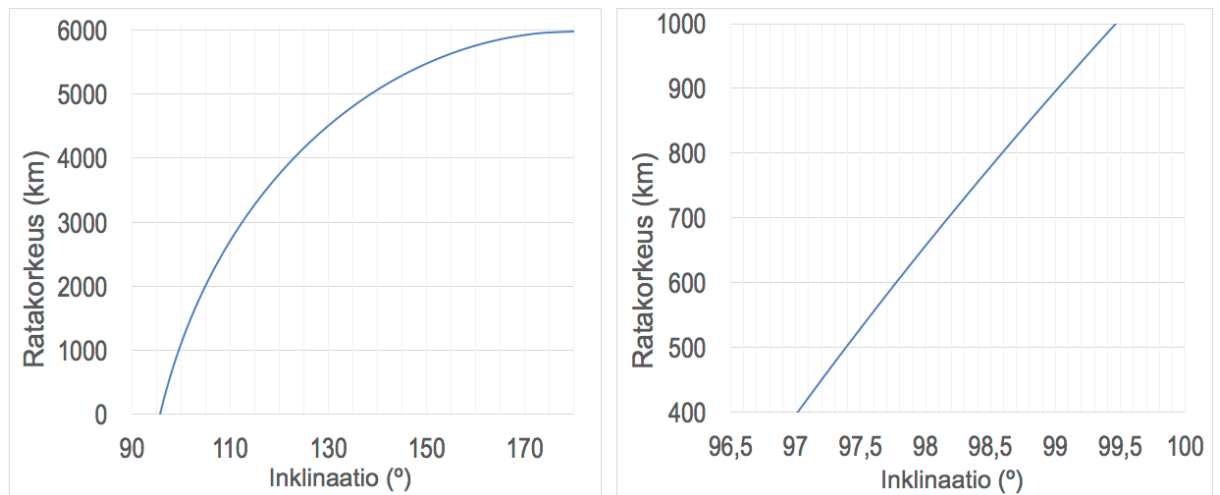
J_2 = Maan litistyneisyydestä johtuva vakio

R_e = Maan säde [m]

e = ellipsin eksentrisyys

i = kiertoradan inkliinaatio [°]

Mikäli oletetaan, että kiertorata halutaan pitää lähes ympyränä eli eksentrisyyttä ei muuteta, niin muuttujiksi jäävät isoakselin puolikas ja inkliinaatio. Toisin sanoen, jos satelliitin rata halutaan aurinkosynkroniseksi, ovat kiertoradan korkeus ja inkliinaatio sidoksissa toisiinsa. Tästä johtuen aurinkosynkronisella radalla olevan satelliitin pienin mahdollinen inkliinaatio on noin 96° ja suurin mahdollinen ratakorkeus noin 6000 km. Korkeudella 400 - 1000 km aurinkosynkronisuus saavutetaan noin $97-100^\circ$ inkliinaatiolla (kuva 9). [14]

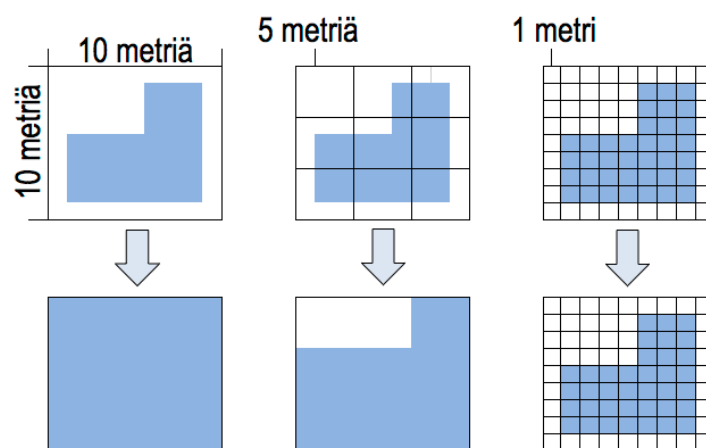


Kuva 9. Satelliitin inkliinaation ja ratakorkeuden yhteys aurinkosynkronisella radalla

Aurinkosynkroniset satelliitit ovat vaaditun inkliinaation takia aina retrogradisilla radoilla [14]. Suurin osa muista satelliiteista on progradisilla radoilla, koska Maan pyörimisestä johtuen satelliitilla on jo ennen laukaisua tätä vastaava nopeus. Tämä olemassa oleva nopeus voidaan hyödyntää maan painovoiman voittamiseksi vaadittavan nopeuden saavuttamisessa, jolloin satelliitin laukaisu on edullisempaa progradiselle kuin retrogradiselle radalle [11].

2.4 Alueellinen erottelukyky ja kattavuus

Alueellisella eli spatiaalisella erotuskyvyllä tarkoitetaan satelliittikuvasta erottuvan pienimmän kohteen kokoa tai toisin sanoen etäisyyttä jolla kaksi vierekkäistä kohdetta erottuu toisistaan (kuva 10). Resoluutiolla tarkoitetaan yleensä juuri spatiaalista erottelukykyä ja sen yksikkö on metri. Satelliittikuvissa sensorin resoluutio pääsääntöisesti tarkoittaa myös samalla sen muodostamien pikselien koon vastaavuutta maanpinnalla. Esimerkiksi jos sensorin resoluutio on 0,50 m niin kuvan yksi pikseli vastaa luonnossa $0,50 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$ aluetta.



Kuva 10. Pikselikoon vaikutus kuvan muodostumiseen

Satelliitin alueellinen kattavuus riippuu satelliitin kuvaussensorin ominaisuuksista, eli lähinnä siitä, että kuinka suuren alueen satelliitti kykenee kerralla kuvaamaan. Alueellinen kattavuus on kääntäen verrannollinen kuvaussensorin alueelliseen erottelukykyyn. Mitä parempi alueellinen kattavuus halutaan, sitä huonompi alueellinen erottelukyky yleensä on. Tämä osoitetaan tarkemmin luvuissa 3.1 ja 3.2.

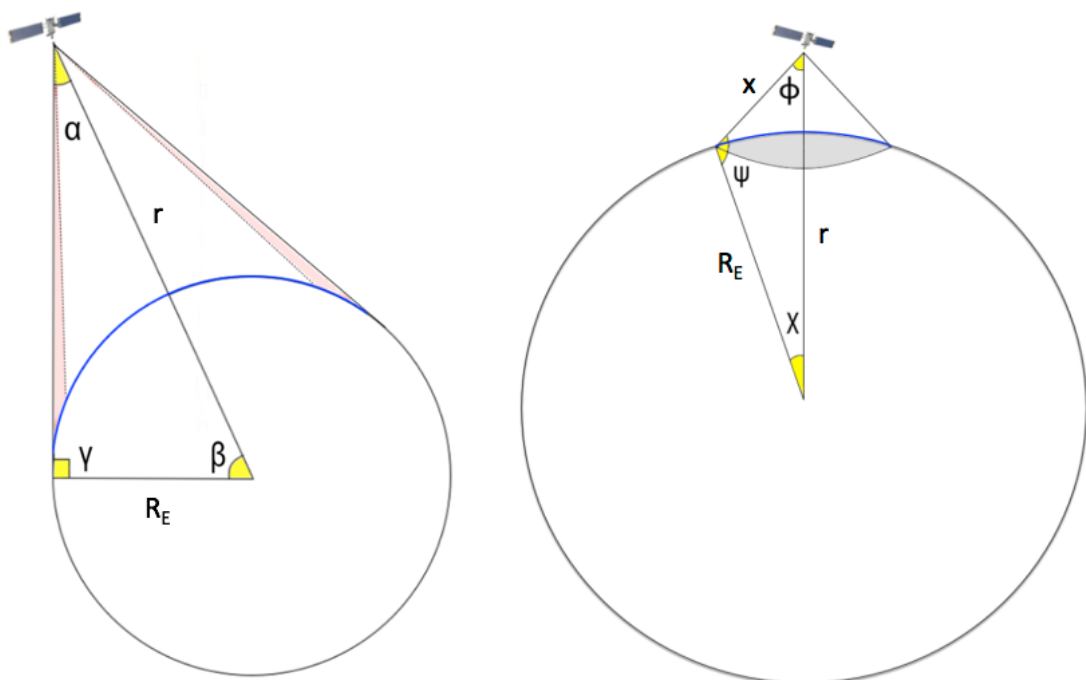
Sensorin näkökentän laajuus on sensorikohtainen ominaisuus ja sotilassatelliittien osalta tarkkaa arvoa ei todennäköisesti saada selville. Maan kaarevuudesta johtuen voidaan laskea suurin mahdollinen kulma satelliitin korkeuden suhteen, koska horisontti on näkökentän rajana. Tähtitieteessä nadiirilla tarkoitetaan suoraan havaitsijan alapuolella olevaa pistettä (zeniitin vastakohta). Kulma satelliitin nadiirin ja horisontin välillä voidaan ratkaista seuraavasti (kuva 11) [23]:

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{R_E}{r} \quad \text{ja} \quad \beta = \cos^{-1} \frac{R_E}{r}$$

Etäisyys nadiirista horisonttiin voidaan ratkaista kaavalla (kulma radiaaneina) [23]:

$$S_w = 2\beta \cdot R_E \quad \text{eli} \quad S_w = 2 \cos^{-1} \left(\frac{R_E}{r} \right) \cdot R_E$$

Mikäli satelliitin ratakorkeus olisi 500 km, olisi horisontin ja nadiirin välinen kulma noin 68° eli koko näkökentän laajuus olisi 136° ja satelliitin kuva-alan leveys olisi noin 9800 km.



Kuva 11. Näkökentän laajuuteen ja kuva-alan leveyteen liittyvä trigonometria

Kun satelliitin näkökentän laajuus tiedetään, voidaan kuva-alan leveys laskea sinilauseen avulla:

$$\frac{R_E}{\sin \phi} = \frac{x}{\sin \chi} = \frac{r}{\sin \psi}$$

Maan säde ja satelliitin ratakorkeus muodostavat kolmion pitkän sivun ja toinen tunnettu sivu saadaan Maan säteestä (kuva 11). Sensorin näkökenttä jaetaan puoliksi, jolloin saadaan käytettävä kulma. Käytetään satelliitin ratakorkeutena jälleen 500 km ja näkökenttänä 100° :

$$\frac{R_E}{\sin \phi} = \frac{r}{\sin \psi} \quad \text{eli} \quad \psi = \sin^{-1}\left(\frac{r \cdot \sin \phi}{R_E}\right)$$

Tulokseksi saadaan $55,7^\circ$, mutta koska tässä tapauksessa haluttu kulma $> 90^\circ$, niin $\beta = 180^\circ - 55,7^\circ = 124,3^\circ$. Kun tiedetään kolmion kaksi kulmaa, voidaan laskea kolmas kulma eli tässä tapauksessa $5,7^\circ$. Etäisyys nadiirista kuva-alan rajalle lasketaan samalla tavalla kuin aiemmin ja tulokseksi saadaan noin 1270 km, jolloin kuva-alan leveys on noin 2540 km. Ero horisonttiin verrattuna on todella merkittävä, sillä vaikka näkökenttä kasvaa nadiirista noin 36 %, niin kuva-alan leveys kasvaa noin 670 %.

Mitä lähemmäksi horisonttia kuvataan, sitä enemmän sivusta satelliitti joutuu kuvaamaan. Horisonttiin kuvatessa kuvauskulma olisi jo suoraan sivusta. [23] Tästä johtuen kuvien vääristymät kasvavat ja eivätkä kuvat enää tietyn pisteen ylittyessä ole käyttökelpoisia [24]. Tarkkaa kulmaa kuvien käytettävyyden rajaksi ei pystytä määrittelemään yleisesti, koska se riippuu kuvien käyttötarkoituksesta ja satelliitin ratakorkeudesta [24].

Tästä johtuen käyttökelpoinen maksiminäkökenttä ei ole horisonttiin asti. Asiaa käsitellään tarkemmin alaluvuissa 3.1 ja 3.2, joissa määritellään sensorityyppikohtaisesti simuloinnissa käytettävien arvojen perusteet elektro-optisille ja tutkasatelliiteille. Sensorit eivät myöskään käytännössä kykene kuvaamaan koko kuva-alalle tarkasti, jolloin mahdollisesta kuva-alasta kuvataan vain pieni osa. Kuvattu alue on riippuvainen sensorityypistä ja sen ominaisuuksista. Tätä on myös kuvattu tarkemmin alaluvuissa 3.1 ja 3.2.

2.5 Ajallinen kattavuus

Ajallisella kattavuudella eli toistovälillä tarkoitetaan aikaa, jonka välein tehdyt havainnot voidaan toistaa. Mitä pienempi aikaviive on, sitä parempi ajallinen erottelukyky on. Yksittäisen satelliitin osalta kuvauksen toistettavuus riippuu satelliitin rataparametreista, sen alueellisesta kattavuudesta ja kuvatun alueen leveyspiiristä [25]. Kuvatun alueen leveyspiirillä on vaikutusta, koska naparadoilla olevat satelliitit ylittävät napa-alueiden läheiset alueet huomattavasti tiheämmin kuin päiväntasaajan läheiset alueet (kuva 8)

Ajalliseen kattavuuteen vaikuttavat myös kuvaustehtävän käskyttämisestä aiheutuvat viiveet. Näitä saattaa aiheuttaa esimerkiksi satelliitin tietoliikennejärjestelyt tai mahdollisten maa-asemien sijainti. [26]

Mikäli kohteen tiedusteluun on käytettävissä vain yksi satelliitti, on ajallinen erottelukyky rajoittunut. Tiedon lähettäminen kohdealueesta on mahdollista reaaliajassa, mutta kuvauksen aloittamiseen tehtävänannosta voi kestää kohtuullisen pitkään, useista tunneista jopa vuorokauteen. Useiden satelliittien konstellatioissa, jossa tehtävänanto on mahdollista satelliittien välisten linkkien avulla, voidaan päästä jopa alle tunnin vasteaikoihin. Usean satelliitin konstellatio mahdollistaa myös kuvauksen toistettavuuden useasti vuorokaudessa. [27]

2.6 Satelliitin elinkaari

Satelliitin elinkaari riippuu suurelta osin sen järjestelmien ja komponenttien luotettavuudesta sekä polttoaineen määrästä [12]. Polttoainetta kuluu satelliitin kiertoradan korjaamiseen sekä mahdollisten ratakorkeuden muutosten tekemiseen.

Satelliitin kiertorataan vaikuttaa useita eri häiriötekijöitä: ilmanvastus (ilmakehän partikkeleja löytyy vielä 1000 km korkeudestakin), auringon, kuun ja muiden planeettojen vetovoimat, Maan gravitaatiokentän vaihtelut, auringon säteilynpaine sekä säteilynpaineen ja Maan magneettikentän vuorovaikutus. [28] Näistä kiertoradan häiriöistä johtuen kaikkien satelliittien tarkasta sijainnista ei voida olla jatkuvasti selvillä. Satelliitin radan ennustamiseksi voidaan tehdä varsin luotettavia malleja, mutta mitä matalammalla radalla satelliitti on, sitä epätarkempi siitä tehty malli on. [12] Radan ennustaminen on mahdollista tarkasti ainakin viikkojen tai jopa kuukausien päähän [29].

Satelliitin ratakorkeuden ollessa alle 560 km ilmanvastus on edellä mainituista häiriötekijöistä merkittävin. Sitä korkeammalla elinkaari määräytyy pääasiallisesti järjestelmien ja komponenttien kestävyys mukaan [30]. Ilmanvastuksen merkittävyys johtuu siitä, että se hidastaa satelliitin ratanopeutta. Tällöin myös satelliitin ratakorkeuden on laskettava, sillä gravitaatiovakio tai Maan massa eivät muutu ($v = \sqrt{GM/r}$). Ratakorkeuden laskiessa ilmakehä muuttuu tiheämmäksi ja ilmanvastus kasvaa entisestään. Tämä taas kiihdyttää entisestään ratakorkeuden muutosta. Ratakorkeuden säilyttämiseksi satelliitin on käytettävä propulsiojärjestelmäänsä ratakorjausten tekemiseen tai se putoaa lopulta takaisin Maan pinnalle. [29] Esimerkiksi noin 150 km korkeudessa lentävä satelliitti putoaa takaisin Maahan jo parin ratakierroksen jälkeen, mikäli se ei käytä propulsiojärjestelmää korjatakseen rataansa [30].

Satelliitin kiertorataa voidaan muuttaa tietyin rajoituksin, mutta muutokset kuluttavat polttoainetta, joka lyhentää satelliitin elinkaarta. Radan korjaukseen liittyvät ohjauskomennot voivat olla lyhyitä, mutta esimerkiksi geostationaarisen satelliitin siirtäminen kattamaan toista aluetta voi viedä viikkoja tai jopa kuukausia. [12] Satelliitin täytyy myös säännöllisesti korjata rataansa kumotakseen kiertorataan vaikuttavien häiriöiden vaikutuksen ja pysyäkseen suunnitellulla radalla, mikä kuluttaa polttoainetta [10]. Mikäli polttoainetta käytetään muuhun kuin radan korjaukseen, lyhentää se satelliitin elinkaarta [29].

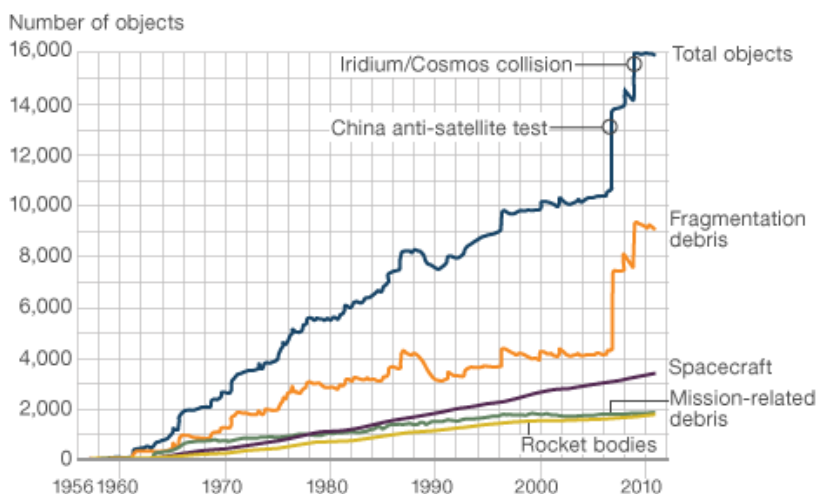
Satelliitin ratakorkeus onkin yleensä kompromissi halutun kuvausresoluution ja polttoaineen kulutuksen väliltä. Kaupallisilla kuvaussatelliiteilla ratakorkeus on yleensä 600 - 900 km välillä, jolla saavutetaan pitkä elinkaari. Sotilassatelliitit saattavat käyttää myös matalampia kiertoratoja paremman resoluution saavuttamiseksi. [28]

Satelliittien huoltaminen ei ole mahdollista niiden elinkaaren aikana. Niiden käyttövarmuus perustuu päällekkäisten järjestelmien olemassa oloon, järjestelmien kestävään suunnitteluun ja vaihtoehtoisten osajärjestelmien käyttömahdollisuuteen. [12] Useat kaupalliset toimijat ja valtiot suunnittelevat huoltojärjestelmiä satelliiteille, joilla niiden elinkaarta voitaisiin pidentää sekä korjata avaruusromua pois kiertoradoilta. Tällä hetkellä näitä ei vielä kuitenkaan ole käytössä. [30]

Vanhan satelliitin korvaaminen uudella ei ole yksinkertaista ja se vaatii huolellista suunnittelua sekä valmistelua. Nykyisillä laukaisuohjelmilla aika valmistelusta laukaisuun on noin 40–150 päivää olettaen, että kaikki tarvittava materiaali on jo valmiina laukaisupaikalla. Laukaisun jälkeen paikantarkistus ja kiertoradan varmistus voivat vielä huomattavasti pidentää aikaa ennen, kun satelliitti on operatiivisessa käytössä. [31]

Satelliitin käytön päättyessä ratakorkeudesta riippuen se joko putoaa hiljalleen takaisin Maahan tai jää romuksi kiertoradalle. Avaruusromu on suuri ongelma, koska se voi osuessaan vaurioittaa nykyisiä satelliitteja ja luoda tätä kautta lisää avaruusromua. Joidenkin arvioiden mukaan tulevaisuudessa törmäys voi aiheuttaa ketjureaktion, jonka seurauksena osa kiertoradoista saattaa muuttua käyttökelvottomiksi vuosisatojen ajaksi. [7]

Growth of orbital space objects including debris



Source: Nasa

Kuva 12. Avaruusromun määrän lisääntyminen Maan kiertoradoilla [32]

Kuvasta 12 nähdään kuinka vuonna 2007 Kiinan tuhotessa oman vanhan satelliittinsa, se nosti huomattavasti romun määrää kiertoradoilla ja sama ilmiö havaitaan vuonna 2009, kun kaksi toimivaa satelliittia törmäsi toisiinsa. Kiinan asejärjestelmän kokeilusta levisi noin 900 yli 10cm kappaletta korkeudeltaan 200–3850 km välisille kiertoradoille ja lisäksi noin 35 000 pienempää kappaletta, joita ei kyetä seuraamaan pienen koon takia [30].

Tämän johdosta satelliittien tuhoamista ei nähdä suurvalloissakaan välttämättä parhaana keinona vastustajan satelliittien käytön estämiseksi, koska samalla on suuri mahdollisuus, että myös omat resurssit vaarantuvat heti tai seurannaisvaikutusten johdosta. Satelliittien käyttö voidaan estää myös esimerkiksi väliaikaisesti elektronisella häirinnällä tai vaurioittamalla pelkästään sensoria suurenergisellä säteellä. [10]

3. ERI SATELLIITTITYYPIT TIEDUSTELUKÄYTÖSSÄ

Tiedustelusatelliitit voidaan jakaa neljään tyyppiin, kuvaustiedustelusatelliitteihin (Imagery Intelligence, IMINT), signaalitiedustelusatelliitteihin (Electronic Intelligence, ELINT), ohjusten laukaisuja tarkkaileviin ennakkovaroitussatelliitteihin ja ydinräjähdyskä tarkkaileviin satelliitteihin [SATTEC]. Kaksi viimeistä satelliittityyppiä eivät muodosta uhkaa alusyksiköiden maalittamiselle. Myöskään signaalintiedustelulla eivät voi havaita alusta, mikäli ne eivät aktiivisesti lähetä sähkömagneettista säteilyä radioilla tai sensoreilla. Alus pystyy estämään siis signaalitiedustelun omalla säteilyhallinnallaan. Koska tutkimuksen tarkoitus on käsitellä tiedustelusatelliittien luomaa uhkaa alusten maalittamiselle, säilyy työn pääpaino satelliittityyppien osalta kuvaustiedustelusatelliiteissa. Ennakkovaroitussatelliitit ja ydinräjähdyskä tarkkailevat satelliitit rajataan tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Satelliittikuvauksen käytettävyys korostuu rauhanaikana, jolloin lentotiedustelu tai miehittämättömien ilma-alusten käyttäminen vieraan valtion alueella ei ole mahdollista ilman poikkeuslupia. Kriisiaikana ilmapuolustusjärjestelmät vaikuttavat lentokoneiden ja miehittämättömien ilma-alusten käytettävyyteen kuvaustiedustelussa. [27] Merivoimien osalta asia on osittain päinvastainen, koska normaalioloissa Suomenlahden läpi lentävät ilma-alukset pystyvät kuvaamaan hyvin koko eteläisen rannikko-alueen. Poikkeusoloissa tai kriisiaikana taas oma hävittäjätorjunta saattaa estää vapaan Suomenlahden läpi lentämisen.

Satelliittien käytettävyyteen kriisiaikana vaikuttaa vastustajan kyky tuhota satelliitteja eli niin sanottu ASAT-kyky (Anti-Satellite). Käytännössä kaikilla ydinasevaltioilla on kyky tuhota LEO-radoilla olevia satelliitteja räjäyttämällä ydinlataus avaruudessa. Tästä aiheutuva sähkömagneettinen pulssi tuhoaa tai ainakin vaurioittaa kaikkia satelliitteja jopa useamman sadan kilometrin säteellä räjähdyksestä [33; 34]. Kiertoradalle jää räjähdysen seurauksena todennäköisesti niin paljon romua, että kaikki LEO-radoilla olevat satelliitit tuhoutuvat muutaman viikon tai kuukauden kuluessa [33; 34]. Yhdysvallat ja Kiina ovat osoittaneet oman ASAT-kykynsä tuhoamalla omia elinkaaren päässä olevia satelliitteja edellä mainittua hienovaraisemmilla keinoilla [27].

3.1 Optiset ja elektro-optiset kuvaussatelliitit

Kuvaustiedustelusatelliitit ovat yleensä noin 500–3000 kilometrin korkeudella LEO-kiertoradoilla, jotta ne pystyvät ottamaan mahdollisimman korkearesoluutioisia kuvia [20]. Nämä satelliitit voidaan jakaa vielä kahteen alatyyppiin: optisen alueen satelliitteihin ja tutka-satelliitteihin. Optisen ja tutka-alueen kuvaussatelliittien kiertoradat vastaavat pääsääntöisesti toisiaan [27]. Optisen alueen satelliitteja ovat optiset ja elektro-optiset satelliitit.

Ensimmäiset tiedustelusatelliitit laukaistiin avaruuteen 1960-luvun alussa. Nämä olivat optisia kuvaussatelliitteja, jotka tallensivat kuvansa perinteiselle filmille. Filmikapseli pudotettiin satelliitista maahan ja kuvat kehitettiin vasta tämän jälkeen. Satelliittien elinikä oli alussa varsin lyhyt, koska satelliiteissa pudotusta varten olevien filmikapselin määrä oli rajattu. Kun ne loppuivat, niin satelliitista ei ollut enää hyötyä ja sen annettiin vähitellen pudota kiertoradaltaan. Ensimmäiset kuvaussatelliitit pysyivät kiertoradallaan vain noin viikon, mutta ainakin Yhdysvaltojen kuvaussatelliittien elinkaari piteni 1970-luvulle tultaessa noin 20 päivään ja 1980-luvun puolivälissä jopa noin 100 päivään. Elinkaaren kasvaminen johtui todennäköisesti filmin, paluukapseleiden ja polttoaineen lisäämisestä satelliitteihin. [35]

Ensimmäiset elektro-optiset kuvaussatelliitit otettiin käyttöön 1970-luvun puolessavälissä kaupallisten satelliittiyriyten ja Yhdysvaltojen asevoimien toimesta. Nämä tallensivat kuvat digitaalisesti, joka mahdollisti kuvatun datan siirtämisen välittömästi radioteitse maahan. Ensimmäisissä elektro-optisissa satelliiteissa kuvan resoluutio oli kuitenkin huonompi kuin optisissa satelliiteissa, joten esimerkiksi Yhdysvallat käytti kummankin tyyppisiä satelliitteja samanaikaisesti vielä lähes 10 vuoden ajan, kunnes elektro-optisten satelliittien kuvanlaatu oli saatu filmikuvien tasolle. [35] Tämän jälkeen satelliittien elinkaari nousi merkittävästi, koska ainoaksi elinkaarta rajoittavaksi tekijäksi jäi satelliitin polttoaine ja komponenttien kestävyys.

Venäjä otti elektro-optiset kuvassatelliitit käyttöön 1980-luvun alussa [35]. Toisin kuin Yhdysvallat, Venäjä ei kuitenkaan lopettanut optisten kuvaussatelliittien käyttöä, vaan on käyttänyt niitä edelleen 2010-luvulla [35; 36]. Venäjällä käytössä olevia satelliitteja käsitellään tarkemmin luvussa 5.

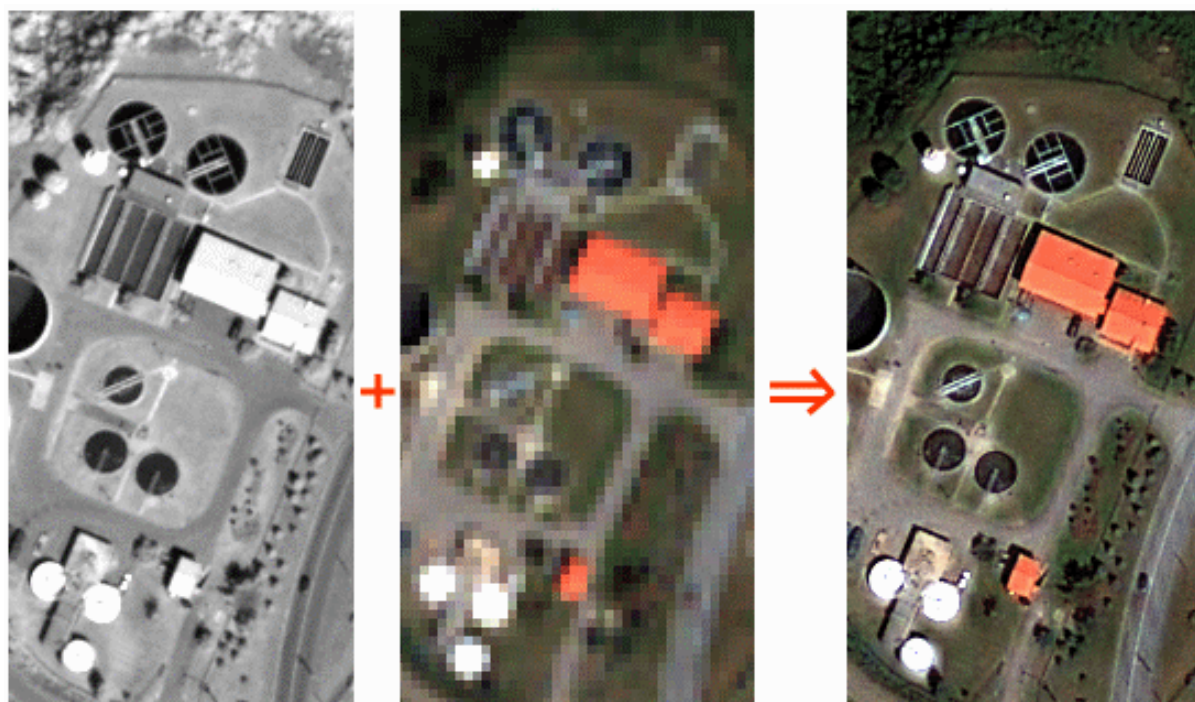
Elektro-optisen satelliittikuvauksen vahvuutena on erittäin hyvä alueellinen erottelukyky. Paras resoluutio on pääsääntöisesti yksikanavaisissa eli pankromaattisissa kuvissa. Kanavilla tarkoitetaan eri aallonpituusalueita. Yksikanavaiset kuvat ovat aina mustavalkoisia, koska ihmisen silmän näkemien normaalien värien muodostamiseen täytyy kuvata ainakin kolmea

erillistä kanavaa, jotka yhdistämällä saadaan värikuva (punainen 620–750 nm, vihreä 495–570 nm ja sininen 450–495 nm). Yksikanavaisessa satelliittikuvauksessa käytetään yleensä koko näkyvän valon aluetta (450nm–800 nm). Koska yksikanavaisessa kuvassa kaikki värien sävyt tallennetaan samaan kanavaan, ne näkyvät värien sijasta vain eri sävyinä mustan ja valkoisen väliltä. Yksikanavaisen kuvan etuna on, että vastaanottaessa säteilyenergia laajemmalta kaistalta, on samassa ajassa vastaanotettu säteilyn kokonaismäärä suurempi kuin kapeammalta kaistalta vastaanotetun säteilyn. Tämä tarkoittaa sitä, että kuvanilmaisoin on herkempi.

Monikanavaisia kuvia voidaan kutsua multispektriseksi tai hyperspektriseksi. Multispektrisissä kuvissa käytetään yleensä alle parikymmentä kanavaa sisältävää spektriä, jossa kanavat eivät välttämättä sijaitse vierekkäin. Hyperspektrisissä kuvissa taas käytetään yleensä satoja vierekkäisiä kanavia. [37] Edellä mainitut tekniikat mahdollistavat kuvan analysoinnin, joka ei perustu pelkästään kohteen muotoon, vaan myös sen spektriin ominaisuuksiin [27]. Multispektrisyys tai hyperspektrisyys ei kerro suoraan käytettävää taajuusaluetta, mutta kuvaussatelliittien osalta multispektrisen sensorin kanavista suurin osa yleensä lähellä näkyvän valon aluetta (esimerkiksi Sentinel-2-satelliitin kanavat: sininen 490 nm, vihreä 560 nm, punainen 665nm, lähi-infrapuna 842 nm ja lyhytaaltoinfrapuna 1160 nm sekä 2190 nm [38]).

Spektrisillä ominaisuuksilla tarkoitetaan sitä, että esimerkiksi kasvillisuus, maaperä, vesi ja erilaiset rakennusmateriaalit heijastavat ja absorboivat eri taajuisia säteilyä eri tavoilla. Tätä voidaan verrata näkyvän valon taajuudella muodostettuun kuvaan ja havaita kuvasta esimerkiksi näkyvän valon taajuudella maastoutettuja asejärjestelmiä, jotka heijastavatkin eri taajuusalueilla säteilyä ympäristöstään poiketen. Sotilassovelluksissa hyperspektrisen tai multispektrisen datan mahdollisuudet ovatkin erityisesti naamioitujen kohteiden havaitsemisessa, koska havainnointi perustuu kohteen spektriin ominaisuuksiin eikä spatiaalisiin muotoihin. [37]

Yksikanavaiset kuvat väritetään yleensä menetelmällä, josta käytetään termiä ”pansharpening”. Tätä voidaan tehdä erilaisilla menetelmillä ja algoritmeilla, mutta käytännössä yksikanavainen korkearesoluutioinen kuva fuusioidaan monikanavaisen huonompioresoluutioisen kanssa ja tuloksena saadaan korkearesoluutioinen värikuva (kuva 13) [39].



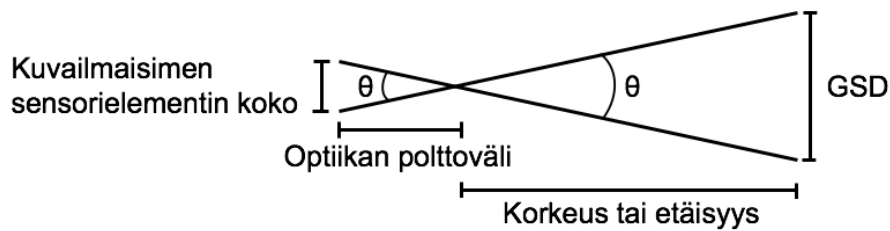
Kuva 13. Kuvien terävöitys korkearesoluutioiseksi värikuvaksi [39]

Yleisen käsityksen mukaan optisen alueen kuvaussatelliitit eivät kykene toimimaan pimeässä. Arvioiden mukaan kuitenkin jo myöhemmissä optisissa kuvaussatelliiteissa oli kyky kuvata myös infrapuna-alueen kuvia [35]. Yhdysvaltojen elektro-optisissa satelliiteissa arvioidaan olevan kyky kuvata ainakin lähi- (Near-Infrared, NIR 0,7–1,1 μm), lyhytaalto- (Short-wavelength Infrared, SWIR 1,1–3,0 μm), ja keskiaaltoinfrapuna-alueilla (Mid-wavelength Infrared, MWIR 3,0–5,0 μm) [20]. Suurimmalla osalla uudemmissa kaupallisista kuvaussatelliiteista on kyky kuvata lyhytaaltoinfrapuna-alueella.

Lyhyillä aallonpituuksilla kohteesta tuleva säteily on peräisin auringosta ja pitkillä aallonpituuksilla kohteesta itsestään. Tämän takia lyhytaaltoista infrapunasäteilyä voidaan kutsua heijastavaksi ja pitkäaaltoista termiseksi infrapunaksi (Thermal Infrared, TIR). Rajana tässä jaotelussa on pidetty yleensä 3,0 μm aallonpituutta. Termisen infrapunan alueella toimivilla sensoreilla voidaan kuvata myös pimeällä ja ohuen pilviverhon läpi, koska niille riittää kohteesta itsestään syntyvä lämpösäteily. [30; 40] Taustan kanssa saman lämpöiset kohteet eivät kuitenkaan erotu kuvista. Infrapunasensorit soveltuvat hyvin esimerkiksi alusten havaitsemiseen pimeällä [30]. Käytännössä ongelmana termisen infrapunan alueella on, että optiikkaa ei voida valmistaa samasta materiaalista kuin näkyvän valon alueella [40; 41]. Esimerkiksi tavallinen lasi muuttuu läpinäkyvämmäksi yli 2,7 μm aallonpituuksilla sen sisältämän veden vuoksi. Germanium on yleisin materiaali 8–12 μm alueella, mutta koska säteily alle 2,0 μm alueella ei läpäise sitä, ei sitä voida käyttää näkyvän valon alueella. [40]

Näkyvän valon ja lähi-infrapunan aluetta ei voida siis kuvata samalla optiikalla kuin termistä infrapuna-aluetta. On mahdollista, että samassa satelliitissa on useita eri optiikoita eri taajuusalueille, mutta koska korkea resoluutio edellyttää suurta optiikkaa, on satelliitin pääsensori todennäköisesti tarkoitettu tietylle taajuusalueelle ja optiikka suunniteltu sen mukaisesti. Satelliitin laukaisu rajoittaa sen painoa ja kokoa, joten muut taajuusalueet käyttävät todennäköisesti pienempää optiikkaa. Germaniumista olisi mahdollista valmistaa korkean resoluution mahdollistava optiikka. Sitä ei voida käyttää näkyvän valon alueella, niin sen käyttö ei välttämättä olisi järkevää kustannusten kannalta, mikäli oletetaan, että näkyvän valon alueelta saadaan eniten tiedustelutietoa.

Satelliittien optinen erottelukyky voi olla rajoittunut joko kuvailmaisimen sensorelementistä tai optiikasta johtuen. Erottelukyky määrittyy siis sen mukaan, kumpi näistä on huonompi. [42]



Kuva 14. Sensorelementin koon ja optiikan polttovälin vaikutus resoluutioon [42]

Kuvailmaisimen osalta erottelukyky riippuu sensorelementtien väliin jäävästä tilasta (pitch), joka on nykYTEknologialla lähes sama kuin itse sensorelementin koko [42]. Pienimmäksi teoreettisesti saavutettavissa olevaksi elementtikooksi arvioidaan noin kaksi kertaa sensorin käyttämä aallonpituus eli 1 μm alueella se olisi 2 μm . Tähän ei kuitenkaan päästä nykYTEknologialla valmistustekniikan asettamien rajoitusten takia. [40]

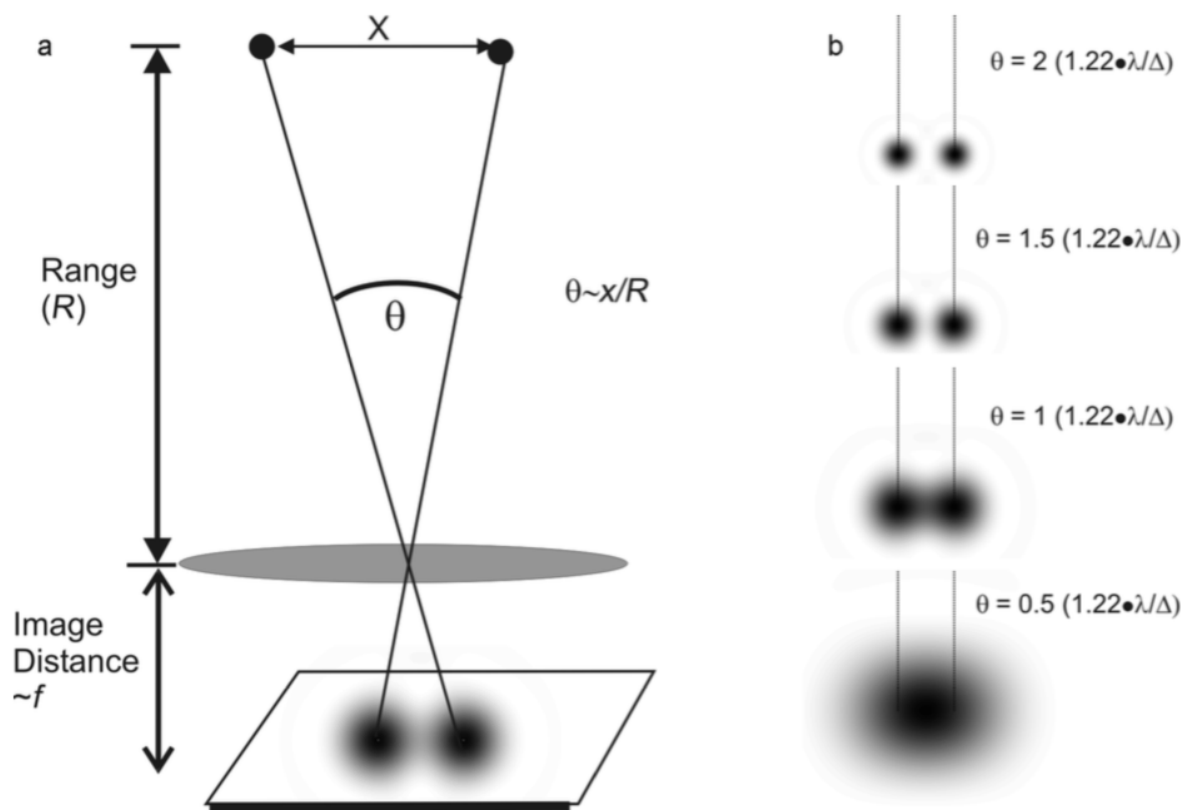
Tiedustelusatelliitin kuvailmaisimen erottelukyky (Ground Sample Distance, GSD) voidaan siis laskea (kuva 14): [42]

$$\frac{GSD_d}{H} = \frac{d}{f} \quad \text{eli} \quad GSD_d = \frac{d}{f} \cdot H$$

f = optiikan polttoväli [m]

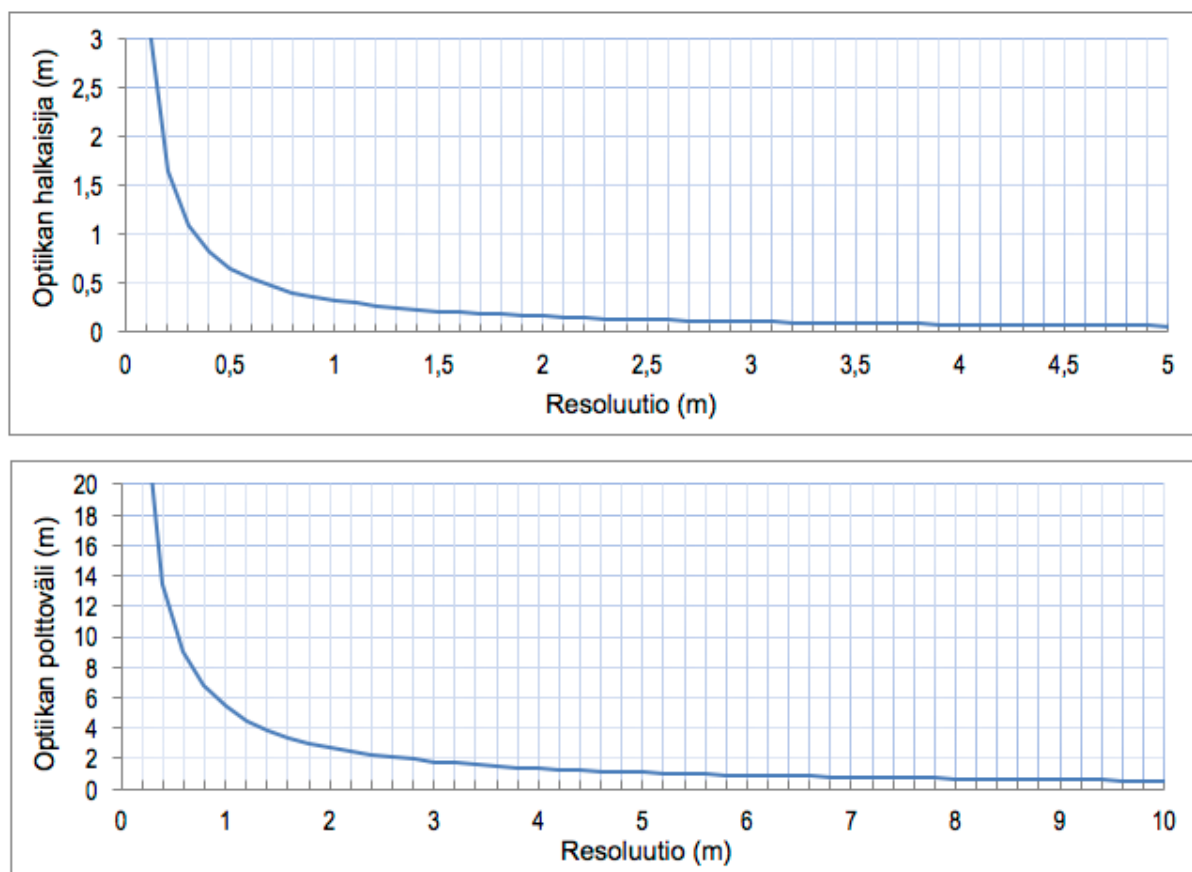
d = sensorelementin koko (tai elementtien väliin jäävä tila) [m]

Erottelukykyyyn vaikuttaa kuvailmaisimen lisäksi myös optiikka. Optiikan osalta erottelukyky riippuu valon säteiden taipumisesta kulkiessaan linssin läpi. Kahdesta eri kohteesta heijastuva valo taipuu linssissä ja molemmista muodostuvan diffraktiokuvion keskusmaksimin leveys riippuu linssin halkaisijasta. Mikäli diffraktiokuviot ovat niin lähellä toisiaan, että niiden keskusmaksimit sulautuvat yhteen, ei näitä kohteita voida enää erottaa toisistaan vaan ne nähdään yhtenä pisteenä. Rayleighin kriteerin mukaan pyöreällä linssillä pienin kulma, jossa kohteet voivat erottua toisistaan on $\sin \theta = 1,22 \cdot \lambda / D$, missä λ on sensorin käyttämä aallonpituus [m] ja D optiikan halkaisija [m]. Pienillä kulmilla $\sin \theta$ on likimäärin yhtä kuin θ . Mikäli θ on vähemmän kuin $1,22 \cdot \lambda / D$, niin kohteet nähdään yhtenä pisteenä (kuva 15). [42]



Kuva 15. Rayleighin kriteeri [42]

Tiedustelusatelliitin optiikan suurin erottelukyky voidaan laskea: $GSD_D = H \cdot (1,22 \cdot \lambda / D)$ [42]. Kuvasta 16 havaitaan, että resoluution kasvaessa korkeammaksi kuin 0,50 m kasvaa siihen vaadittavan optiikan halkaisijan koko merkittävästi. Tämä on yksi syy korkearesoluutioiden satelliittijärjestelmien kalleuteen. Osa uusista korkearesoluutioisista kaupallisista satelliiteista on maksanut jopa 300–550 miljoonaa euroa. [43]



Kuva 16. Optiikan halkaisijan ja polttovälin suhde resoluutioon (ratakorkeus 600 km, aallonpituus 450 nm)

Tällä hetkellä tarkimmat kaupalliset satelliitit, joiden optiikasta ja kuvailmaisimen koosta on julkaistu tietoa ovat GeoEye-1 ja WorldView-2. Molempien pankromaattisen kuvailmaisimen sensorelementin koko on $8\text{ }\mu\text{m}$ ja niitä on kuvailmaisimen rivissä 35 000. Molemmissa optiikan polttoväli on 13,3 m ja halkaisija 1,1 m. [44; 45] Satelliittien ratakorkeudeksi on ilmoitettu 770 km [46; 47]. Pankromaattisen alueen aallonpituus on WorldView-2:lla 450–800 nm ja GeoEye-1:llä 450–900 nm [44; 45]. Molempien satelliittien ilmoitettu resoluutio on 0,46 m [46; 47].

Näitä tietoja ja aiempia kaavoja käyttämällä saadaan sensorelementin erotuskyvyksi 0,46 m, mikä vastaa ilmoitettua resoluutiota. Laskettaessa optiikan erottelukyky aallonpituuksilla 450 nm ja 800 nm, saadaan tulokseksi 0,38 m ja 0,68 m. Tässä tapauksessa kuvailmaisimen erottelukykyä rajoittava tekijä taajuusalueen alapäässä ja optiikka rajoittava tekijä sen yläpäässä.

Arvioiden mukaan Yhdysvaltojen tiedustelusatelliittien tarkkuus oli 1960-luvulla noin 8–10 cm [35]. Tätä voidaan verrata Yhdysvaltojen KH-11-satelliittin kolmannen kehitysversion tietoihin. Satelliittien ratakorkeudet olivat lähimmillään noin 250 km [40]. Erään arvion mukaan optiikan polttoväli oli 19,2 m ja halkaisija 2,4 m [48]. Koska kuvailmaisimesta ei ole

julkisia tietoja, käytetään 8 μm arvoa, joka selkeästi on nykytekniikalla mahdollinen. Myöskään sensorin käyttämä aallonpituus ei ole tiedossa, joten oletetaan satelliitin kuvaavan pankromaattisesti näkyvän valon alueella ja käytetään siksi alueen keskellä olevaa arvoa 550 nm. Näillä arvoilla saadaan sensorielementin erotuskyvyksi noin 0,10 m ja optiikan erotuskyvyksi noin 0,07 cm. Päästään siis todella lähelle kirjallisuudessa esitettyjä arvioita sotilassatelliittien tarkkuudesta. Pääsääntöisesti kuvailmaisoin vaikuttaa olevan erottelukykyä rajoittava tekijä.

Kosolan mukaan termisen alueen infrapunailmaisimissa päästään noin 50 μm elementtiväleihin [40]. Sotilassatelliiteissa käytetyistä infrapunasensoreista on vielä vähemmän tietoa kuin näkyvän valon alueella toimivista sensoreista, mutta ainakin Yhdysvaltojen ennakkovaroitus-satelliittijärjestelmässä ohjuslaukausten havaitsemiseen käytettiin 2,7 μm aallonpituutta [42]. Käyttäessä näitä arvoja saadaan sensorielementin resoluutioksi 0,65 m ja optiikan resoluutioksi 0,34 m. Yhdysvallat ei välttämättä ole kuitenkaan käyttänyt tähän tarkoitukseen yhtä hyvää optiikkaa kuin varsinaisissa tiedustelusatelliiteissa.

Tällä hetkellä tarkimman käytössä olevan kaupallisen kuvaussatelliitin (WorldView-3) resoluutio on näkyvän valon alueella 0,31 m ja SWIR-alueella 3,7 m. SWIR-alueen aallonpituus on kohtalaisen lähellä näkyvää valon aallonpituutta, joten resoluutioiden pitäisi olla lähempänä toisiaan. Nyt eroa on huomattavasti. Täten on mahdollista, että joko sotilassatelliittien infrapunailmaisimet ovat huomattavasti kaupallisia edellä tai Kosolan arvio niiden elementtitiheydestä on todella optimistinen. Toinen mahdollisuus on myös se, että satelliitit käyttävät eri optiikkaa näillä taajuusalueilla, vaikka SWIR-alueen säteily läpäiseekin vielä lasin. Pienempi optiikka lyhyemmällä polttovälillä selittäisi myös suuren eron resoluutiossa.

Sensorin kuva muodostuu vierekkäisistä pikseleistä, jos tiedetään yhden pikselin koko maanpinnalla ja kuvailmaisimessa olevien elementtien rivimäärä, voidaan laskea kuvan leveys Maan pinnalla. Esimerkiksi Ikonos-satelliitin pankromaattisen kuvailmaisen sensorielementin koko on 12 μm ja multispektraalisen sensorielementin koko 48 μm , optiikan polttoväli on 10 m ja ratakorkeus 680 km [49]. Näiden perusteella voidaan laskea erottelukyky molemmille sensorielementeille:

$$GSD_{dPAN} = \frac{(12 \cdot 10^6) \text{ m}}{10 \text{ m}} \cdot (680 \cdot 10^3) \text{ m} = 0,816 \text{ m}$$

$$GSD_{dMS} = \frac{(48 \cdot 10^6) \text{ m}}{10 \text{ m}} \cdot (680 \cdot 10^3) \text{ m} = 3,264 \text{ m}$$

Ikonoksessa pankromaattisessa kuvailmaisemassa yhdellä rivillä on 13816 pikseliä (sensorielementtiä) ja multispektraalisessa kuvailmaisimessa 3454 pikseliä [49]. Täten voidaan laskea kuvattavan alueen leveys:

$$S_{wPAN} = \frac{13816 \cdot (12 \cdot 10^6) m}{10 m} \cdot (680 \cdot 10^3) m = 11,27 km$$

$$S_{wMS} = \frac{(3454 \cdot (48 \cdot 10^6) m)}{10 m} \cdot (680 \cdot 10^3) m = 11,27 km$$

Kuvan leveys on pidetty tarkoituksella molemmissa samana. Sensorielementit multispektrissä kuvailmaisimessa ovat fyysisesti suurempia, joten kuvailmaisimesta tullut fyysisesti suurempi, jos elementtien määrä olisi pidetty samana ja se ei olisi mahtunut enää samalle ilmaisimatriisille (kuva 17).

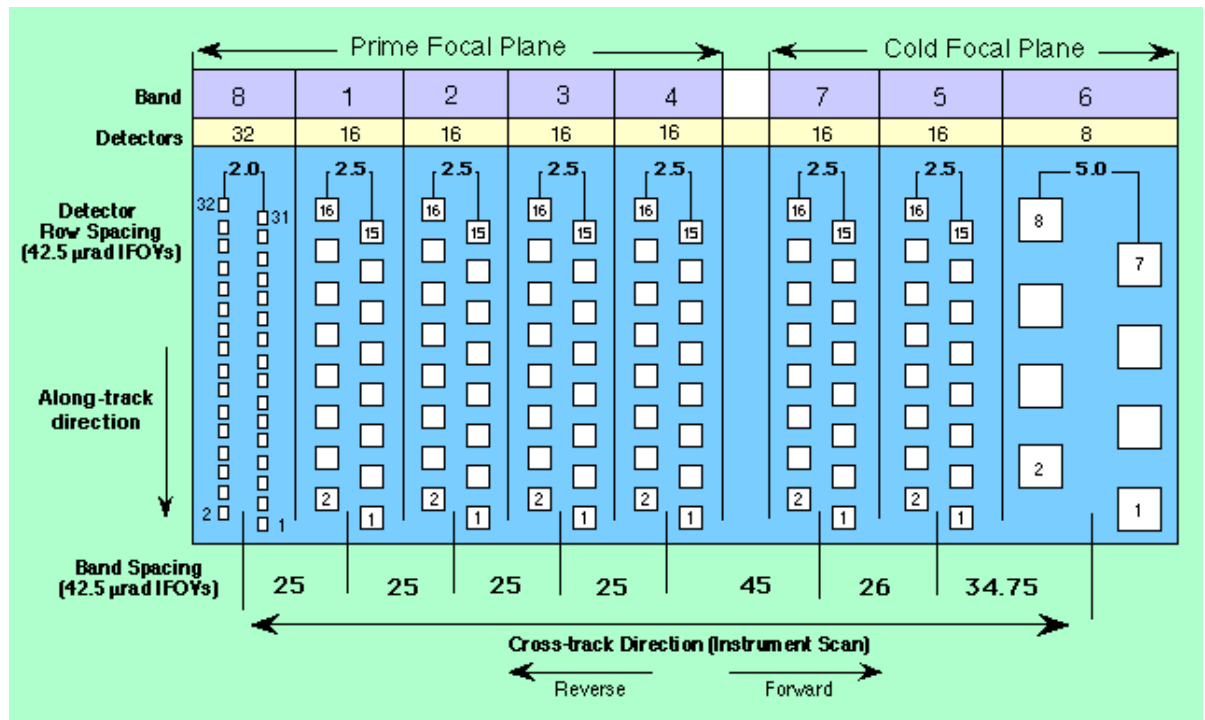
Mikäli multispektrisen kuvailmaisimen pikselimäärä olisi pidetty samana kuin pankromaattisessa tai optiikan polttoväliä lyhennetty olisi satelliitti kyennyt kuvaamaan huomattavasti leveämmän alueen kerralla:

$$S_{wMS} = \frac{13816 \cdot (48 \cdot 10^6) m}{10 m} \cdot (680 \cdot 10^3) m = 45,1 km$$

$$S_{wMS} = \frac{13816 \cdot (48 \cdot 10^6) m}{2,5 m} \cdot (680 \cdot 10^3) m = 45,1 km$$

Ikonoksen resoluutioksi on ilmoitettu pankromaattisesti 0,81m ja multispektraalisesti 3,2 m sekä kuvanleveydeksi 11,3 km [49]. Voidaan todeta siis laskujen pitävän hyvin paikkansa. Lisäksi havaitaan, että optiikan polttoväli ja kuvailmaisimen sekä sensorielementin kokot vaikuttavat merkittävästi kuvattavan alueen kokoon ja erottelukykyyneen. Laajemman alueen kuvaaminen olisi mahdollista kuvailmaisimen pikselimäärää kasvattamalla tai optiikan polttoväliä lyhentämällä.

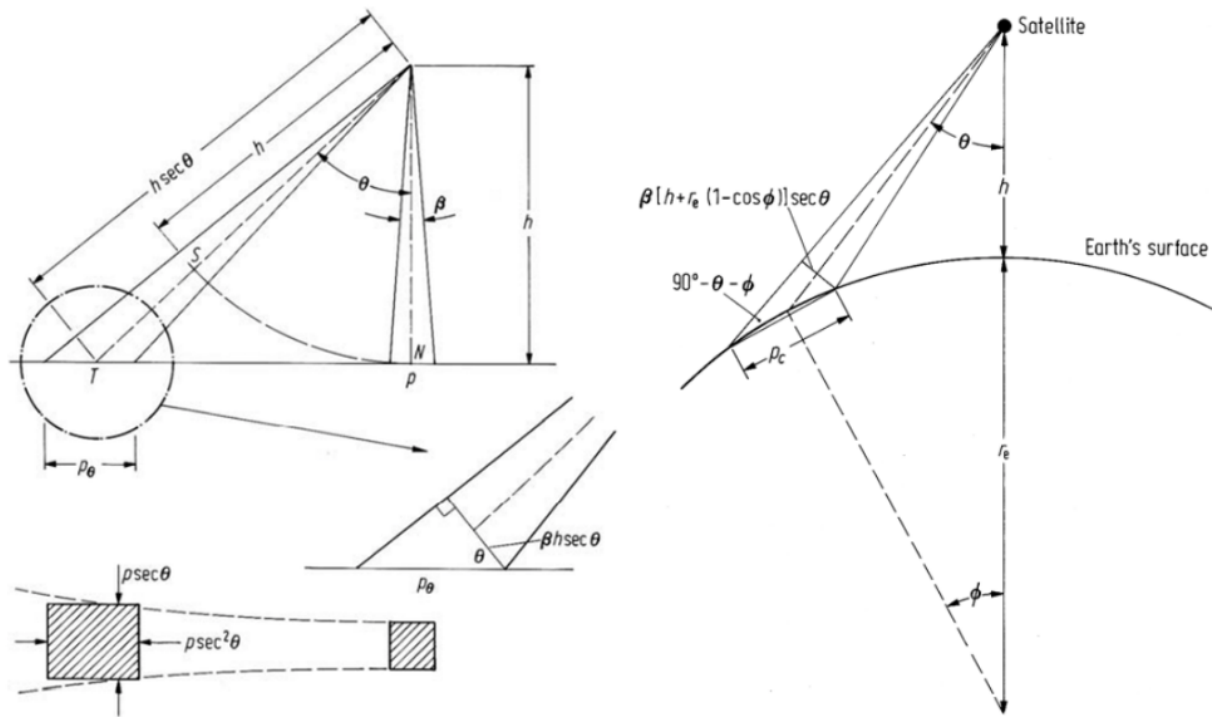
Multispektraalisia kuvailmaisimia ei tarvitse rakentaa yhtä pieniksi kuin pankromaattisia, koska sama tulos saadaan terävöittämällä kuva jälkikäteen, minkä avulla voidaan taas säästää valmistuskustannuksia. Tyypillinen suhde sensorielementtien koossa on 1:4 pankromaattisen ja multispektraalisen välillä [6]. Kuvasta 17 nähdään, että eri kanavien kuvailmaisimet ovat matriisissa samankokoisia, vaikka sensorielementtien koko vaihtelee kanavan aallonpituuden mukaan. Kanava 8 on pankromaattinen, kanavat 1–4 näkyvän valon alueella ja kanavat 5–7 infrapuna-alueella [42].



Kuva 17. Landsat 7-satelliitin ilmaisinmatriisi [42]

Sensorelementtien koon, määrän ja optikan polttovälin suhteesta johtuu siis luvussa 2.5 mainittu sensorin erottelukyvyn ja alueellisen kattavuuden välinen yhteys. Mitä pidempi polttoväli optiikassa on, sitä parempi on resoluutio kuvassa, mutta sitä kapeampi on myös kuvattavan alueen leveys. Uudemmissa järjestelmissä polttovälin muuttaminen on mahdollista kuten normaalin kameran zoom-objektiivilla [30]. Tästä johtuen kuvien tilaajan täytyy määrittää käyttötarkoitukseen riittävä resoluutio ja mikäli tämä ei ole satelliitin korkein mahdollinen resoluutio, niin satelliitti voi kuvata suuremman alueen samalla kerralla [30].

Satelliittien kuva on tarkimmillaan nadiirissa. Trigonometriasta ja Maan kaarevuudesta johtuen kuva vääristyy mitä kauemmas nadiirista kuvataan, pikselin koko kasvaa ja muodot vääristyvät (kuva 18). [50; 51] Vääristymät pystytään korjaamaan kohtalaisen hyvin kuvan prosessoinnin yhteydessä orto-oikaisuksi kutsutulla menetelmällä. Erään lähteen mukaan jo yli 30° kulmilla kuvatut kuvat eivät ole käyttökelpoisia kaikkiin tarkoituksiin, koska kuvien vääristymiä ei voida enää korjata äärimmäisillä kulmilla. [50] Toisen lähteen mukaan taas jopa 60° kulmilla kuvatut kuvat voivat olla edelleen käyttökelpoisia esimerkiksi muotojen havaitsemiseen [24].



Kuva 18. Kuvauskulman vaikutus kuvan tarkkuuteen [52]

Kuvasta 19 huomataan, että 60° kulmalla kuvattu kuva on huomattavasti epätarkempi korjattunakin. Kuvan laatu siis hieman kärsii äärimmäisillä kuvilla, vaikka korjaaminen on mahdollista. Ei voida siis pitää todennäköisenä, että tämän tasoisesta kuvasta havaittaisiin taistelu-alusta, mikäli se olisi lähes maastonvärinen ja tukeutuneena saaren rantaan.



Kuva 19. Vasemman puolinen kuva suoraan nadiirissa kuvattuna ja oikean puolinen kuva 60° kulmalla kuvattuna (vääristymät korjattuna) [24]

Käyttökelpoinen kuvauskulma alusten havaitsemiseen lienee 30–60° välillä. Vääristymän suuruus voidaan laskea kaavalla [51; 53]:

$$GSD_{xy} = \frac{GSD \cdot h}{H} \left(\left(\cos^2 \gamma + \frac{\sin^2 \gamma}{\cos^2 \alpha} \right) \cdot \left(\left(\sin^2 \gamma + \frac{\cos^2 \gamma}{\cos^2 \alpha} \right) \right)^{\frac{1}{4}}$$

GSD = satelliitin resoluutio nadiirissa [m]

h = satelliitin ratakorkeus [m]

H = etäisyys satelliitista kuvataan pisteeseen [m]

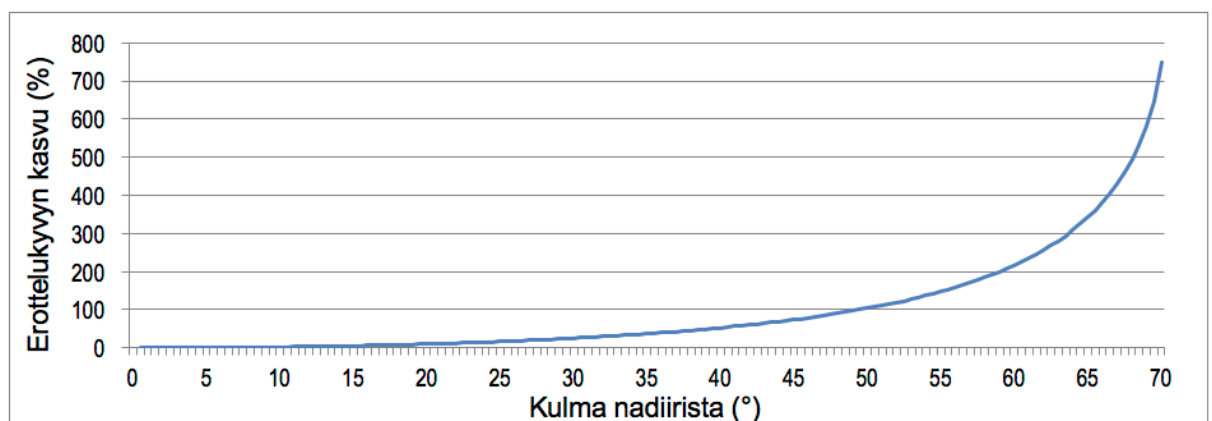
α = käytettävä kuvauskulma [°]

γ = kulma kuvailmasinmatriisin ja kuvattavan kohteen suuntimasta poikittain olevan linjan välissä [°]

γ on usein 0° tai 90° (kuvattaessa suoraan sivulle), jolloin kaava supistuu muotoon [51]:

$$GSD_{xy} = \frac{\frac{GSD \cdot h}{H}}{\sqrt{\cos \alpha}}$$

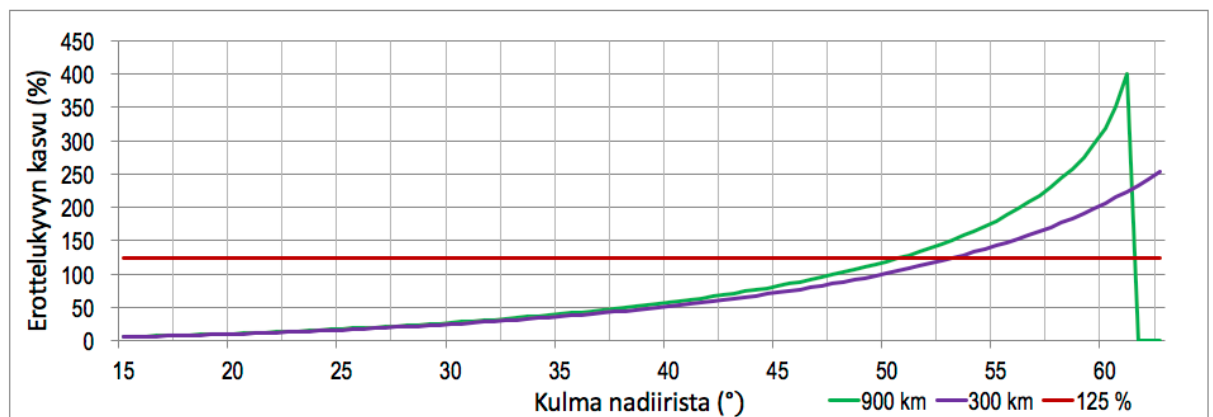
Tuloksena saadaan erottelukyky halutulla kuvauskulmalla, jossa on huomioitu vääristymän suuruus x- ja y-suuntaisesti.



Kuva 20. Pikselikoon kasvu kuvattaessa sivuun nadiirista (ratakorkeus 400 km)

Kuvasta 20 huomataan, että tietyn kulman jälkeen pikselin koko alkaa kasvaa merkittävästi. Aiemmin mainittuun 30° asti vääristymä pysyy kohtalaisen pienenä, mutta 60° kohdalla pikselikoko on kasvanut jo 200 % alkuperäisestä. Kaupalliset toimijat pitävät usein kuvauskulman rajana 45°, mutta pyynnöstä voidaan toteuttaa kuvauksia myös suuremmalla kulmalla [6].

Koska kirjallisuudesta ei löytynyt mitään yleistystä kuvien käyttökelpoisuuden rajaksi, sellainen täytyy määritellä tutkimuksen simulointiosuutta varten. Määrittelyssä käytetään hyväksi vääristymien suuruuksia arvoilla 30° , 45° ja 60° . Koska kaupallisten satelliittien raja-arvo oli 45° , käytetään myös niille tyypillistä ratakorkeutta. Luvussa 2 todettiin, että suurin osa kaupallisista satelliiteista toimii ratakorkeuksilla 600–900 km, joten käytetään alueen keskiarvoa 750 km. Vääristymän keskiarvo käytetyillä kolmella kuvauskulmalla on noin 125 %, jota käytetään maksimivirheen arvona kaikilla ratakorkeuksilla ja rajoitetaan simuloinnissa käytettävä kuvauskulma sen perusteella.



Kuva 21. Eroittelukyvyyn kasvun rajaksi määritetty 125 % alkuperäisestä koosta suhteessa satelliitin ratakorkeuteen

Kuvasta 21 huomataan, että 300 ja 900 km ratakorkeuksilla virheraja ylittyy noin 53° ja 51° kuvauskulmilla. Kuvasta nähdään myös, miten horisontti tulee vastaan 900 km ratakorkeudella noin 63° kohdalla. Tämä perusteella rajoitetaan tutkimuksen simuloinneissa matalilla kiertoradoilla toimivien optisen alueen kuvaussatelliittien kuvauskulmaksi 52° .

Yhteenvetona voidaan siis todeta, että resoluutioon ja kuva-alaan voidaan vaikuttaa korkeutta, polttoväliä tai kuvailmaisimen kokoa muuttamalla. Suuret muutokset ratakorkeuteen laukaisun jälkeen eivät ole järkeviä polttoaineen kulutuksen vuoksi ja kuvailmaisimen fyysisen koon muuttaminen jälkikäteen on mahdotonta. Optiset ja elektro-optiset satelliitit toimivat sekä infrapunalla että näkyvän valon taajuusalueilla. Pimeässä optisen alueen satelliitit voivat kuvata vain termisen infrapunalla alueella, jolloin resoluutio on ainakin hieman huonompi suuremmasta aallonpituudesta johtuen, mutta optiikan valmistusmateriaalilla todennäköisesti on suurempi vaikutus resoluutioon kuin käytetyllä aallonpituudella.

Olosuhteet vaikuttavat merkittävästi optisen alueen tiedustelusatelliittien käyttöön. Suomen säälle on tyypillistä pilvisyys ja vuodenajoista johtuva valoisuuden vaihtelu, jotka ovat optisen satelliittikuvauksen merkittävimmät rajoittavat tekijät [27]. Koko Suomea tarkasteltaessa hyviä tai kohtalaisia ilmakuvauksipäiviä (näkyvyys yli 30 km) on vain 50 kpl/vuosi [27]. Vaikka pilvipeitto olisi kuvattavan kohteen alueella vain vähäistä, saattaa yksittäinenkin pilvi peittää kuvauksen onnistumisen kannalta kriittistä tietoa.

Auringon korkeuskulmalla voidaan määritellä raja-arvot, joiden mukaan kyetään tarkastelemaan kuvauksen tyypillisiä onnistumismahdollisuuksia esimerkiksi tunteina vuorokaudessa haluttua kuukautta kohti. Kaupallisia optisen alueen satelliittikuvia ei ole saatavissa alle 15 asteen korkeuskulmalla kuin erikoistilauksesta [27; 54]. Lisäksi yleensä alle 7 asteen korkeuskulmalla kuvausta ei suoriteta lainkaan [27; 54]. Jopa alle 30 asteen auringon korkeuskulmalla kuvatuissa kuvissa saattaa ilmetä niin tummia alueita, etteivät ne ole käyttökelpoisia kaikkiin tarkoituksiin [55]. Auringon korkeuskulma vaihtelee vuorokauden ajan lisäksi myös vuoden ajan mukaan Maan liikkuessa auringon ympäri.

Liitteessä 1 on tarkasteltu auringon korkeuskulman vaikutuksia Suomenlahden alueella tapahtuvaan näkyvän valon taajuudella suoritettavaan satelliittikuvaukseen. Käytännössä marraskuun alun ja tammikuun lopun (kolme kuukautta) välissä on päivittäin alle 4 tuntia kuvaus aikaa (yli 7 astetta). Helmikuussa ja lokakuussa on noin 7 tuntia kuvaus aikaa. Toisin sanoen Suomenlahden alue on huonosti tai välttävästi kuvattavissa viisi kuukautta vuodesta.

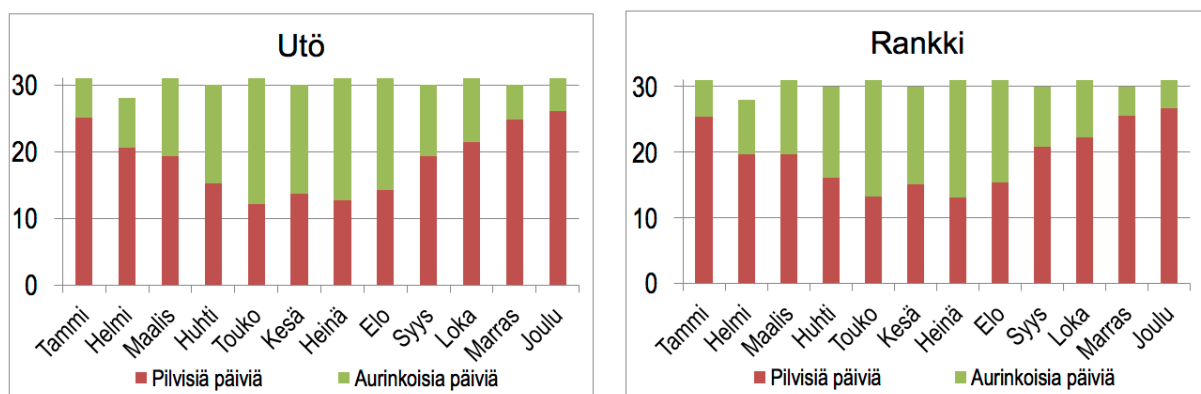
Auringon korkeuskulmaa voidaan tarkastella myös Euroopan avaruusjärjestö ESA:n Sentinental-2 kuvien kautta, jotka ovat julkisesti saatavilla ESA:n Sentinental Scientific Data Hub -internet-palvelusta. Satelliitti otettiin käyttöön loppuvuodesta 2015 ja ensimmäinen Etelä-Suomen alueelta oleva kuva on otettu 29. marraskuuta auringon korkeuskulman ollessa noin $8,2^\circ$. Seuraava kuva Etelä-Suomen alueelta löytyy vasta 11. tammikuuta auringon korkeuskulman ollessa noin $7,5^\circ$. Palvelussa ei ole joulukuulta eikä tammikuun alusta yhtään kuvaa, jolloin auringon korkeuskulma olisi käytännössä jatkuvasti alle 7 astetta. Tämän tutkimuksen liitteessä 3 on käytetty Sentinental-2-satelliitin kuvia, jotka on kuvattu auringon korkeuskulman ollessa 8 astetta. Kuvat ovat erittäin käyttökelpoisia, joten voidaan olettaa yleisesti, että auringon korkeuskulman ollessa yli 7 astetta otetut satelliittikuvat ovat käyttökelpoisia.

Pilvisyys on runsasta Suomessa etenkin syksyllä ja talvella. Pilvisiä päiviä, jolloin vähintään 80 % taivaasta on pilvien peitossa, on kaikkina kuukausina enemmän kuin selkeitä päiviä. Eniten selkeitä päiviä on touko-kesäkuussa, vähiten marras-joulukuussa. [56] Ilmatieteenlai-

tos on julkaissut tilastot Suomen auringonpaistetunneista eri paikoissa vuosien 1981–2010 välillä. Tilastoissa auringonpaistetunneilla tarkoitetaan sitä, kuinka monta tuntia aurinko paistaa esimerkiksi päivän tai kuukauden aikana. Auringonpaistetuntien määrään vaikuttaa auringon nousu- ja laskuaikojen lisäksi pilvisyys ja sade. Auringonpaistetunneilla tarkoitetaan suoraa, kirkasta auringonpaistetta, jolloin horisontin tai pilven läpi kajastavasta auringonpaisteesta ei kerry auringonpaistetunteja. [57]

Ilmatieteenlaitoksen mukaan hämärä vallitsee silloin, kun aurinko on horisontin alapuolella mutta ei ole vielä tai enää täysin pimeää. Voidaan olettaa, että auringonpaistetunteja tulee, kun aurinko on horisontin yläpuolella. Tämän perusteella voidaan laskea halutun paikan suurin mahdollinen auringonpaistetuntien määrä, kun käytetään auringon korkeuskulman arvona 0° . Tätä suurinta teoreettista arvoa voidaan verrata vuosikymmenien tilastolliseen kuukausittaiseen keskiarvoon ja laskea erotuksesta pilvisten tuntien keskimääräinen lukumäärä valoisa-
na aikana.

Tarkasteluun valittiin Saaristomeren länsiosista Utö ja Suomenlahden itäosista Rankki. Paikkojen pilvisyyden tarkastelulla saadaan kohtalaisen hyvä käsitys pilvisyyden vaihtelusta Etelä-Suomen rannikkoalueilla.



Kuva 22. Pilvisyys Utön ja Rankin alueilla kuukausittain

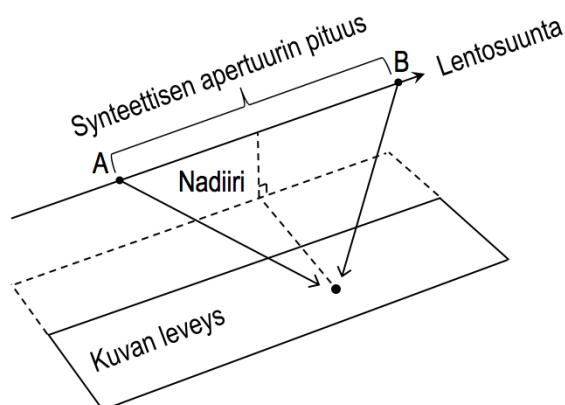
Ilmatieteen laitoksen yleistys koko Suomen alueelle oli, että pilvisiä päiviä on joka kuukaute-
na enemmän kuin selkeitä päiviä. Edellä mainittujen laskujen tuloksista (kuva 22) havaitaan,
että Utössä ja Rankissa on selkeitä päiviä enemmän touko-elokuun välisenä aikana. Silloinkin
niitä on vain hieman yli puolet kuukaudesta, ero ei ole siis merkittävä. Tarkempi analyysi
pilvisyydestä ja sen laskentaperusteista on liitteessä 2.

Talvikuukausien osalta sen merkitys on pienempi, koska silloin ei myöskään ole valoisuuden puolesta otollista aikaa kuvaukselle. Maalis-syyskuun välisenä aikana, jolloin valoa olisi enemmän, pilvistä on noin 50 % ajasta. Pilvet estävät käytännössä optisen alueen satelliittien toiminnan termistä infrapuna-aluetta matalammilla taajuuksilla [20].

3.2 Tutkasatelliitit

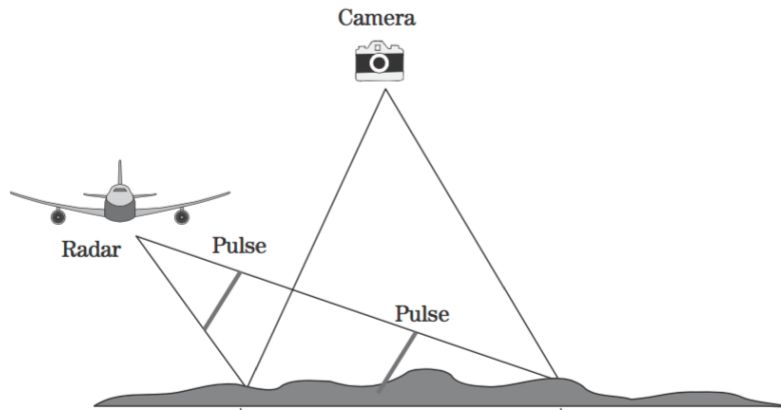
Tutka on laite, joka lähettää sähkömagneettista säteilyä ja vastaanottaa säteilyn heijastuksen havaitakseen ja paikallistaakseen kohteita. Tutkat toimivat yleensä mikroaaltoalueella ja niiden käyttämä aallonpituus on muutamista millimetreistä metriin [58]. Merkittävä etu mikroaaltojen käytöstä on se että ne läpäisevät suurelta osin ilmakehän ja pilvet. Tällöin kuvauksessa päästään riippumattomuuteen pilvisyysolosuhteista, joka on merkittävä haitta näkyvän valon alueen satelliittikuvauksessa [58]. Tutka lähettää mikroaaltosäteilyä ja vastaanottaa oman säteilynsä, joten ei se ole riippuvainen myöskään muista säteilynlähteistä kuten auringosta. Tutka toimii kaikissa pilvisyys- ja valaisuolosuhteissa [59]. Nykyjään käytännössä kaikki kaukokartoituksessa (tutkimuksen tapauksessa tiedustelussa) käytetyt kuvaavat tutkat ovat SAR-tutkia ja tutkasatelliittikuvilla tarkoitetaan SAR-satelliittikuvia [58].

SAR-tutkalla tarkoitetaan synteettisen apertuurin tutkaa (Synthetic Aperture Radar). Radiotekniikassa apertuurilla tarkoitetaan pinta-alaa, josta tehoa kuljettava taso-aalto näyttää säteilevän tai jonka läpi vastaanottoantenni sieppaa saapuvan taso-aallon. SAR-tutka kasvattaa antenniryhmänsä kokoa keinotekoisesti liikkeen avulla: erilliset tutkakaiut tallennetaan muistiin ja käsitellään yhdessä ikään kuin ne olisi mitattu suuresta antennista [60]. Tällöin liikkuvan tutkan antenni on mittauksen kannalta suurempi kuin se on oikeasti fyysisesti, eli apertuurin koko on keinotekoinen (synteettinen). Synteettinen apertuuri on yhtä suuri kuin välimatka, jolla kohde on tutkan näkyvyysalueella (kuva 23) [58].



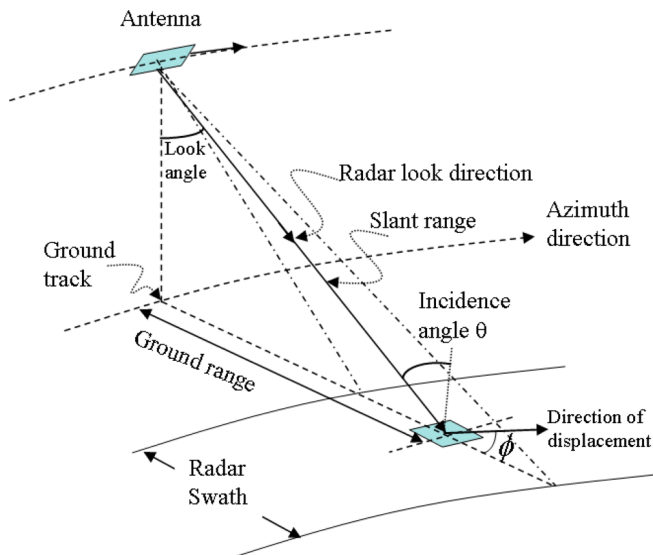
Kuva 23. Synteettisen apertuurin pituus

Koska SAR-kuva muodostuu tutkan lähettämän säteilyn palaamisesta antenniin, korostuvat kuvassa eri asiat kuin optisen alueen kuvauksessa. SAR-kuvassa esimerkiksi tasaiset pinnat, kuten tiet ja lentokentät heijastavat suurimman osan säteilystä poispäin vastaanottimesta, jolloin ne näkyvät tummina kuvissa. Rakennukset ja laivat ovat taas esimerkiksi usein metallisia ja muodoiltaan sellaisia, että ne heijastavat säteilyn takaisin tutkan suuntaan ja näkyvät kuvassa korostetusti. [61]



Kuva 24. Optisen alueen ja tutka-alueen kuvauskulmat [61]

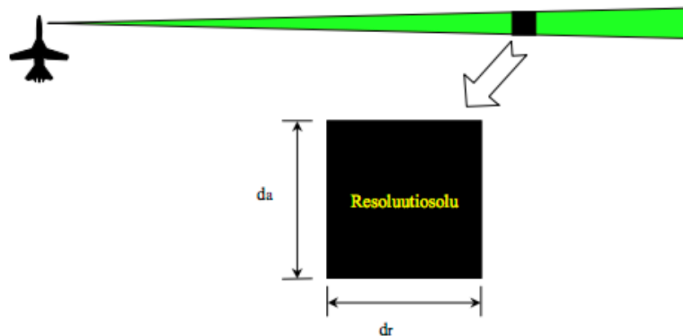
Myös kuvauskulma eroaa merkittävästi optisen alueen kuvauksesta (kuva 24). Optisessa kuvauksessa kuva pyritään ottamaan mahdollisimman suoraan ylhäältä vääristymien välttämiseksi. Tutkakuvauksessa tämä ei ole kuitenkaan mahdollista, koska etäisyys olisi sama useampaan eri kohtaan maan pinnassa, jolloin myös säteily palaisi näistä samanaikaisesti eikä niitä voisi erottaa toisistaan. Kuvaamalla sivusuuntaan etäisyys maan pintaan muuttuu jatkuvasti eikä tutkan vastaanottimeen palaudu samanaikaisesti säteilyä useasta eri kohteesta. [130B] Tyypillisesti SAR-tutkien kuvauskulma on 20–60 asteen välillä (kuvassa 25 nimellä ”look angle”) [62]. Kuitenkin jopa 10 asteen kulmalla voidaan vielä kuvata [62].



Kuva 25. SAR-kuvaukseen liittyviä kulmia ja käsitteitä [63]

Suurin osa avaruudessa toimivista SAR-tutkista toimii 1–10 GHz:n taajuusalueella. Alle yhden GHz:n taajuuksilla ionosfäärissä esiintyvät häiriöt saattavat aiheuttaa merkittäviä virheitä mittauksiin. Yli 10 GHz:n taajuuksilla taas sade saattaa aiheuttaa signaalin merkittävää vaimenemista. Tutkan käyttämä taajuus riippuu usein sen käyttötarkoituksesta. Tiedustelukäytössä taajuus on usein X-alueella (8–12 GHz). X-alue mahdollistaa hieman korkeamman resoluution kuin matalammat taajuudet, mutta pilvisuus ja sade saattavat vaikuttaa signaalin etenemiseen. C-alueetta (4–8 GHz) pidetään hyvänä vaihtoehtona koska siinä häiriötekijöiden vaikutus on mahdollisimman pieni. [64]

SAR-kuvauksessa kuvan resoluutio muodostuu eri tavalla kuin optisen alueen kuvauksessa. Tutkan resoluutiosolu on suorakaiteen muotoinen, jonka leveys määräytyy antennin atsimuuttitason poikittaisresoluutiosta ja pituus tutkan etäisyysresoluutiosta. Atsimuuttitason poikittaisresoluutio d_a muodostuu antennin 3 dB keilanleveydestä halutulla etäisyydellä ja etäisyysresoluutio d_r pulssin pituuden perusteella (kuva 26). Karkean arvion mukaan kohteen tunnistamiseksi tutkan resoluution on oltava noin 1/5 kohteen suurimmasta mitasta. [65] Noin 50 metriä pitkän taistelualuksen tunnistamiseksi resoluution olisi oltava siis vähintään noin 10 metriä.



Kuva 26. SAR-tutkan resoluutiosolu [40]

Tutkan pulssinpituus τ tarkoittaa lähetetyn säteilyn kestoa sekunteina. Erottaakseen kaksi eri etäisyyksillä olevaa kohdetta, pulssin loppuosan täytyy olla ohittanut ensimmäinen kohde ennen kuin pulssin alkuosan heijastus palaa seuraavasti kohteesta eli kohteiden välisen etäisyyden on oltava enemmän kuin puolet pulssinpituudesta. Etäisyysresoluutio voidaan siis laskea: [65]

$$d_r = \frac{c\tau}{2}$$

c = valonnopeus [m/s]

τ = pulssinpituus [s]

Pulssinpituuat ovat usein mikrosekuntien luokkaa, joten likimain oikea tulos saadaan kertomalla pulssinpituus mikrosekunteina 150 metrillä. Esimerkiksi pulssinpituuatella 0,01 µs saavutetaan 1,5 metrin etäisyysresoluutio. Pulssinpituutta ei voida lyhentää rajattomasti, koska signaalin vaatima kaistanleveys rajoittaa sitä. Signaalin vaatima kaistanleveys on likimain $1/\tau$ eli 0,01 µs pulssinpituuatella se on noin 100 MHz. Kaistanleveyden kasvattaminen tietyn rajan yli muuttuu huomattavasti kalliimmaksi ja vaikeammaksi. Tämä raja riippuu käytettävästä taajuusalueesta, mutta se on noin 3–10 % tutkan käyttämästä taajuudesta. [65] Tämän perusteella voidaan todeta, että mitä korkeampi tutkan käyttämä taajuus on, sitä helpommin korkeampi kaistanleveys voidaan saavuttaa. Korkeammilla taajuuksilla päästään lyhyempiin pulssinpituuksiin. Moderneissa satelliiteissa päästään alle metrin etäisyysresoluutioon [58].

Tällä hetkellä yleisin SAR-kuvaustekniikka perustuu dopplerkohdennettuun antenniryhmään ja sen poikittaisresoluutio voidaan laskea kaavalla [61]:

$$d_a = \frac{D}{2}$$

D = antenninen fyysinen halkaisija [m]

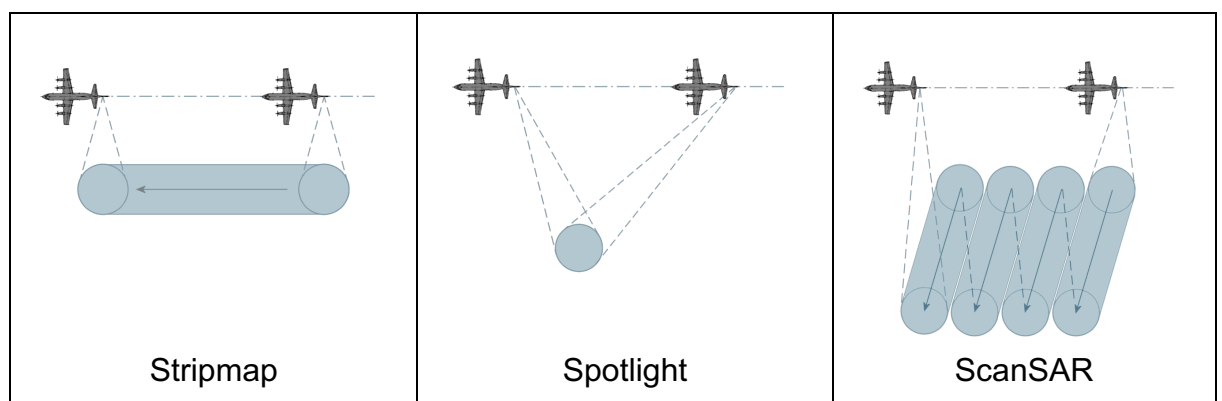
Missä D on tutkan fyysisen antennin halkaisija. Huomioitavaa tässä on, että poikittaisresoluutio ei riipu etäisyydestä eikä käytetystä taajuudesta. Pienemmällä antennin koolla saavutettaisiin jopa parempi resoluutio, mutta samalla se heikentäisi tutkan herkkyyttä [61].

SAR-kuvauksessa etäisyys- ja poikittaisresoluutio eivät ole riippuvaisia kuvausetäisyydestä. SAR-satelliittien korkeuteen vaikuttaa kuitenkin muun muassa tutkan signaali-kohinasuhde. Riittävän signaali-kohinasuhteen saavuttaminen asettaa rajoituksia. Jopa matalilla kiertoradoilla SAR-kuvaaminen edellyttää tutkalta suurta antennia ja kohtalaisen suurta lähetystehoä (huipputeho 1–5 kW) vapaan tilan vaimennuksesta johtuen. Tästä johtuen kaikki SAR-satelliitit ovat toimineet toistaiseksi LEO-radoilla. [64] Esimerkiksi GEO-radalla toimiva satelliitti vaatisi noin 15 kertaa suuremman antennin ja MEO-radalla toimiva satelliitti noin 10 kertaa suuremman antennin kuin LEO-radalla. Myös lähetystehon tarve kasvaisi korkeammilla kiertoradoilla [66].

Vaikka tutkan resoluutio ei muutu kuvauskulman kasvaessa, kuten optisen alueen satelliiteilla, kasvattaa kuvauskulman kasvattamine myös etäisyyttä kuvattavaan kohteeseen. Tämä lisää signaalin vaimentumista. Suurilla kuvauskulmilla kuvatessa korkeuserot aiheuttavat kuvaan

katvealueita. Tutkan kuvatessa sivusuuntaan korkeiden rakennuksien tai mäkien takana olevia kohteita ei nähdä kuvassa, koska signaali heijastuu takaisin kohteen edessä olevasta rakennuksista tai maastomuodoista. Mitä suuremmalla kuvauskulmalla kuvataan, sitä matalammat kohteet aiheuttavat katveja kuvaan. Sama ilmiö tapahtuu myös optisen alueen kuvauksessa, mutta tällöin muut syyt rajoittavat kuvauskulman pienemmäksi. Muun muassa näistä syistä SAR-tutkilla maksimikuvauskulma on tyypillisesti aiemmin mainittu 60° . Useilla kaupallisilla SAR-satelliiteilla kulma on tätä pienempi, mutta toisaalta japanilaisella ALOS-2 PALSAR -satelliitilla maksimikuvauskulma on jopa 70° [67].

SAR-tutkaa operoidaan usein stripmap-, spotlight- tai scanSAR-toimintamuodoissa. Stripmap-toimintamuodossa antennikeila pyyhkäisee kuvattavan alueen ylitse, jolloin kuvaa saadaan jatkuvana virtana ja suuri alue voidaan kattaa kerralla. Saavutettavissa olevan poikittaisresoluution määrittää antennin jalanjälki (eli antennikeilan leveys). Aiemmin esitetty kaava poikittaisresoluution laskemiseen pätee stripmap-toimintamuodon osalta. Spotlight-toimintamuodossa antennikeila pidetään suunnattuna haluttuun kohteeseen satelliitin liikkuesssa, jolloin synteettinen apertuuri kasvaa ja poikittaisresoluutio paranee. Tällöin kuvattavan alueen kooksi rajoittuu poikittaissuunnassa antennin jalanjäljen kokoinen alue. [59] Spotlight-tekniikalla poikittaisresoluutio on tänä päivänä parhaimmillaan noin metrin luokkaa [58]. ScanSAR-toimintamuodossa tutkan keilaa ohjataan sekä etäisyys- että poikittaissuunnassa [68]. Tämä mahdollistaa suuremman kuva-alan, mutta heikentää edelleen resoluutiota. Kuvas- ta 27 nähdään spotlight-, stripmap- ja scanSAR-toimintamuotojen erot.



Kuva 27. SAR-tutkan yleisimpien toimintamuotojen erot [68]

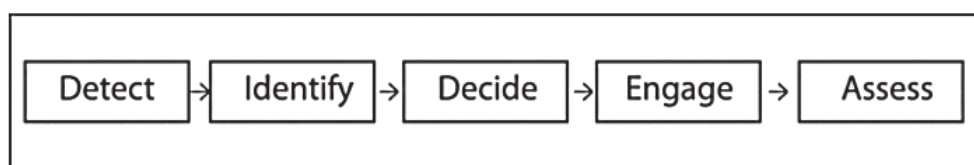
Vaikka SAR-satelliitit eivät tarvitse kuvaukseen auringon valoa, ovat ne silti usein aurinkosynkronisilla radoilla. SAR-tutkan vaatima tehontarve on suuri ja aurinkosynkronisella kiertoradalla saadaan taattua säännöllinen energiantuotto aurinkokennojen avulla. Aurinkosynkroninen rata ei ole kuitenkaan edellytys tutkasatelliittien käytölle. [64]

SAR-satelliittien määrä on huomattavasti optisen alueen satelliitteja vähäisempi. Vuonna 2013 erään arvion mukaan Maan kiertoradoilla oli vain 19 SAR-satellittia [64]. Myös tässä tutkimuksessa tutkasatelliitteja käsittelevä alaluku on optisen alueen satelliitteja suppeampi, koska tutkimuksen pääpaino on optisen alueen satelliiteissa. Arvion mukaan Venäjän käytössä olevasta kaupallisesta ja sotilassatelliittikalustosta enintään yksi on tutkasatelliitti (luku 5).

4. ALUSTEN HAVAITSEMINEN JA MAALITTAMINEN

Satelliittien kehittyneempien prosessointiyksiköiden ja johtamispaikkojen parempien järjestelmien johdosta osa satelliiteista kykenee tuottamaan mahdollisesti lähes reaaliaikaista kuvaa loppukäyttäjälleen [10]. Loppukäyttäjänä voidaan tässä tapauksessa pitää Venäjällä tahoja, joka tekee päätöksiä kohteen maalittamisesta.

Maalittamisprosessilla tarkoitetaan kohteen havaitsemista ja tunnistamista, tulenkäytön suunnittelua ja päätöstä, asejärjestelmän käyttöä ja lopuksi tuho vaikutuksen analysointia. Eräs malli maalittamisprosessista on esitetty kuvassa 28. [69] Maalittamisprosessit todennäköisesti vaihtelevat hieman eri valtioiden välillä, mutta pääperiaate lienee kaikille kuvatun kaltainen.



Kuva 28. Maalittamisprosessin vaiheet [69]

Maalittamisprosessi alkaa kohteen havaitsemisesta. Ennen kuin kohde voidaan havaita satelliittikuvista, kuva täytyy esikäsittellä tiettyjen virheiden poistamiseksi ja kuvan kohdistamiseksi koordinaatistoon. Korjattavia virheitä ovat muun muassa ilmankehästä aiheutuvat häiriöt sekä geometriset korjaukset (kuten aiemmin mainittu kuvauskulmasta johtuva vääristymä). Satelliittikuvat kohdistetaan yleensä johonkin koordinaatistoon, jolloin kuvan vertaaminen karttaan tai aiempiin satelliittikuviin on yksinkertaista. [70] Tätä kutsutaan georeferoinniksi ja se tehdään yleensä osana kuvan esikäsittelyä. Georeferoinnin ansioista kuvassa kaikilla pikseleillä on myös arvo koordinaatteina, jolloin esimerkiksi havaitun kohteen pituuden mittaaminen tai paikan määrittäminen on yksinkertaista paikkatietojärjestelmäohjelmistoilla. Ilman kuvan esikäsittelyä satelliittikuvia ei siis juurikaan kyettäisi hyödyntämään.

Euroopan avaruusjärjestö ESA määrittelee Sentinetal-2-kuvaussatelliitin osalta, että lähes reaaliaikaisuudella (near-real time) tarkoitetaan alle kolmen tunnin viivettä kuvien toimittamisessa ja reaaliaikaisuudella (real time) tarkoitetaan alle 100 minuutin viivettä [71]. Mikäli maa-asema on suoraan satelliitin kantamassa eikä satelliitilla ole käynnissä muuta datan lähetyttä, voidaan kuvat ladata maa-asemalle jopa 10–15 minuutin viiveellä kuvauksesta (quasi-real time) [38]. Lähes reaaliaikaiset kuvat on jo esikäsitelty, kun ne tarjotaan ladattavaksi kolmen tunnin kuluessa kuvauksesta [71].

Venäjä kykenee todennäköisesti samaan nopeuteen kuvien siirrossa kuin Euroopan avaruusjärjestö. Vaikka kuvat saataisiin maa-asemalle noin 15 minuutissa, täytyy ne edelleen siirtää loppukäyttäjälle. Realistisesti arvioiden loppukäyttäjä voisi saada kuvat siis aikaisintaan noin 30-60 minuutin kuluttua kuvauksesta. Tämän jälkeen kuville täytyy tehdä aiemmin mainittu esikäsittely, jonka jälkeen niistä voidaan etsiä haluttuja kohteita. Arvion mukaan kuvauksesta mahdolliseen maalittamisprosessin alkuun kuluu vähintään noin tunti. Maalittamisprosessin vaiheiden läpikäynti vie myös aikaa: esikäsitellystä kuvasta täytyy havaita ja tunnistaa kohde, tulenkäyttö täytyy suunnitella ja välittää käskyt valitulle asejärjestelmälle, asejärjestelmä täytyy valmistella laukaisuun ja laukaisun jälkeen asejärjestelmän hakeutuminen voi kestää laukaisuetäisyydestä riippuen minuuteista kymmeneen minuutteihin. Karkeasti arvioiden aika kuvauksesta mahdollisen asevaikutuksen saapumiseen kohteelle on todennäköisesti lähempänä kahta tuntia. Tässä tutkimuksessa keskitytään maalitusprosessista lähinnä alusten havaitsemiseen ja tunnistamiseen.

Yksinkertaisimmillaan kohteita voidaan etsiä kuvasta vain katsomalla sitä ja havaitsemalla siitä aluksia. Tällä tavalla voidaan havaita lähinnä liikkeessä olevat alukset tai esimerkiksi selkeästi laiturista erottuvat alukset. Näiden havaitsemiseen riittää matalampi resoluutio. NATO:n standardien mukaan (STANAG 3769) satelliittien erottelukykyvaatimukset pinta-alusten osalta ovat taulukon 2 mukaiset:

Taulukko 2. STANAG 3769 mukaiset erottelukykyvaatimukset [72]

Havainto	Luokittelu	Tunnistus	Tekninen analyysi
7,5 –15 metriä	4,5 metriä	0,60 metriä	0,045 metriä

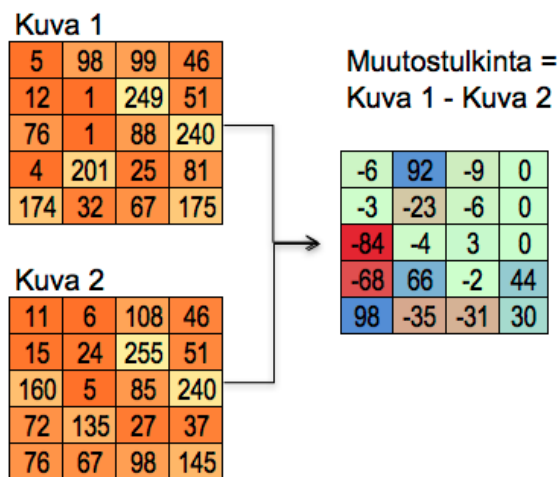
Havaitsemisella tarkoitetaan kykyä huomata kohde ympäristöstään, niin ettei sitä kuitenkaan kyetä tunnistamaan tarkemmin. Luokittelulla tarkoitetaan kykyä havaitsemisen jälkeen myös tunnistaa kyseessä olevan alus. Tunnistuksella tarkoitetaan kykyä määritellä, minkä alusluokan alus kyseessä on (esimerkiksi Hamina- vai Hämeenmaa-luokka). Teknisellä analyysillä tarkoitetaan kykyä erottaa tarkkoja yksityiskohtia aluksen rakenteista. [72]

Havainnon osalta erottelukyvyn suuri vaihteluväli johtuu todennäköisesti alusten kokojen vaihtelusta. Esimerkiksi 300 metriä pitkän aluksen havaitseminen onnistuu huomattavasti huonommalla resoluutiolla kuin 50 metriä pitkän aluksen. Merivoimien alukset ovat maailman valtamerilaivastojen aluksiin verrattuna hyvin pieniä, joten erottelukykyvaatimuksena 7,5 metriä on todennäköisesti lähellä oikeaa. Havaitsemiseen vaadittavaa resoluutiota on ha-

vainnollistettu liitteessä 3. Myös liitteen 3 perusteella arvioituna resoluution on oltava vähintään 10 metriä.

Tukeutumis- tai suojapaikkataktiikalla tarkoitetaan aluksen valitsemaa tai sille käskettyä tukeutumismenetelmää tai suojapaikkaa seuraavaa tehtävää odotellessa. Yleisesti käytettyjä tukeutumismenetelmiä ovat tukeutuminen saareen, liikkuva tukeutuminen ja tukeutuminen ankkuriin tai poijuun. Tukeutumisessa käytetään yleensä naamioverkkoja aluksen havaitsemisen vaikeuttamiseksi. Saareen tukeutunutta alusta, joka on sulautettu rantaviivaan, ei todennäköisesti havaita kuvasta ilman kuvankäsittelyä jollakin menetelmillä. Näiden menetelmien käyttö edellyttää yleensä korkeampaa resoluutiota kuin pelkkä kuvasta katsomalla havaitseminen.

Havaitsemisessa voidaan käyttää esimerkiksi muutostulkinta -menetelmää, jolloin eri aikoina otettujen kuvien tai multispektrisesti saman kuvaustapahtuman eri kanavien muutoksia vertaillaan kuvien välillä. Usein muutostulkinnalla vertaillaan kahtena eri ajankohtana otettua satelliittikuvaa (esimerkki liitteessä 4). Sitä voidaan suorittaa erilaisilla algoritmeilla, mutta pääperiaatteena on, että tietokoneella lasketaan kuvissa olevien pikselien arvot ja verrataan niitä keskenään. Selkeät muutokset kuvien välillä näkyvät tuloksessa yleensä korostetusti, kuten kuvasta 29 nähdään:



Kuva 29. Muutostulkinta yksinkertaistettuna

Samoja menetelmiä voidaan soveltaa multispektristen sensorin osalta samana ajanhetkenä otettuun kuvaan. Multispektrinen kuvaussensori muodostaa jokaisesta kanavasta, eli taajuusalueesta oman kuvansa, jolloin näiden eri kanavien kuvia voidaan vertailla keskenään eri ajankohtana otetun kuvan sijaan. Tämä on mahdollista siksi, että säteily heijastuu kohteesta eri taajuusalueilla eri tavalla takaisin, eli vaikka kohde olisi tietyllä taajuusalueella naamioitu

hyvin ympäristöönsä, niin se saattaa näkyä toisella taajuusalueella hyvin [37]. Tällöin näiden kahden tai useamman kanavan kuvan välillä voidaan suorittaa muutostulkinta. Mikäli kohde jollain taajuusalueella eroaa selkeästi taustasta, niin näkyy se korostetusti tuloksessa.

Useimmat muutostulkinnan -algoritmit eivät toimi kovin hyvin, jos vertailtavien kuvien kuvauskulma eroaa merkittävästi toisistaan [73]. Myös tämän takia simuloinnista voidaan jättää äärimmäiset kuvauskulmat pois, vaikka toisaalta mikään ei kuitenkaan estä kahden äärimmäisillä kulmilla kuvatun kuvan vertailemista keskenään. Multispektraalisen kuvan muutostulkinnassa yksi suuri etu onkin se että kuvauskulma on täsmälleen sama.

Muutostulkinnassa nyrkkisääntönä voidaan pitää sitä, että käytettävän sensorin erottelukyvyn on oltava noin $\frac{1}{4}$ havaittavan kohteen pienimmästä mitasta [73]. Merivoimien käyttämät ohjusveneet ovat leveydeltään noin kahdeksan metriä eli mikäli näitä halutaan havaita kuvasta muutostulkinnalla, kuvausresoluution on oltava noin kaksi metriä. Miinalaivojen kohdalla resoluutiovaatimukseksi muodostuu noin kolme metriä. Tutkimuksessa osoitettiin aiemmin, että näkyvän valon alueella optiset kuvaussensorit kykenevät tähän helposti, samoin kuin ainakin teoriassa myös termisen infrapuna-alueen sensorit. Kaupallisella puolella ei ole kuitenkaan käytössä näin tarkkoja termisen infrapuna-alueen sensoreita, joten on mahdollista, että niitä ei ole myöskään sotilaspuolella.

Varsinaisen muutostulkinnan lisäksi kuvaa voidaan verrata karttapohja-aineistoon. Esimerkiksi Maanmittauslaitoksen Avointen aineistojen tiedostopalvelusta voi ladata koko Suomen rannikon maastokartat, joissa on vesialueiden rajat vektoritasona. Käytännössä kaikki paikkatietojärjestelmäohjelmistot pystyvät näyttämään tämän suoraan satelliittikuvan päällä ja analysoinnin helpottamiseksi koko maa-alue voidaan suodattaa pois näkyvistä, jolloin saarten rannassa olevat ylimääräiset muodot tulevat hyvin näkyviin. Mitään laitureita tai vastaavia rakennelmia vesialueiden karttapohjassa ei luonnollisesti ole huomioitu, joten myös nämä näkyvät kuvia verratessa ylimääräisinä rakenteina. Tämä ei tarkoita sitä, että kaikki rantaviivasta poikkeava huomataan heti. Esimerkiksi eri vuorokauden aikaan otetussa kuvassa varjot näkyvät eri paikoissa ja rannan läheisten puiden varjot saattavat heijastua vedestä, jotka taas näkyvät erona muutostulkinnassa. Myös käytettävä kuvauskulmalla on vaikutusta. Jos kuva on otettu suurella kulmalla, saattavat esimerkiksi puiden latvat näkyä siinä, missä pitäisi olla vesialuetta. Vaikka itse alus näkyisi kuvassa myös korostettuna, saattaa sen huomaaminen olla hankalaa, jos kymmenien kilometrien alueelta jokaisen saaren rannassa näkyy varjoista tai puiden latvoista aiheutuneita eroja.



RNoN FPB "KNM Hauk", 24. FPB sq. Boldgame 1989

Kuva 30. Norjalainen KNM Hauk tukeutuneena saareen [74]



Kuva 31. Arctech Helsinki Shipyardin telakkahalli [75]

Satelliittien radan ennustettavuuden takia kuvaussatelliitteja vastaan voidaan toimia myös piilottamalla kohteita tai antamalla väärää informaatiota niistä ylityksen aikana [29]. Taistelualusten osalta piilottaminen voidaan toteuttaa esimerkiksi aiemmin mainitulla tukeutumisella saaren rantaviivaan ja naamioimalla alus ympäröivän maaston mukaan kuten kuvassa 30. Yksi vaihtoehto on myös ajaa alus esimerkiksi piiloon telakkahalliin. Mikäli alus saadaan suojaan halliin, ei sen havaitseminen onnistu millään kuvantulkintamenetelmällä. Merivoimilla ei ole omia tarkoitukseen sopivia telakkahalleja, mutta telakkateollisuuden puolelta niitä löytyy useampia. Kuvassa 31 on Helsingissä sijaitseva telakkahalli, johon mahtuisi useampi Merivoimien taistelualus.

Väärää informaatiota voidaan antaa esimerkiksi menemällä satamaan kiinni ylityksen ajaksi ja poistumalla sieltä, kun satelliitti on mennyt ohitse. Samoin rakentamalla ja maastouttamalla tukeutumispaiikkoja ilman, että siellä kuitenkaan on oikeaa alusta, voidaan antaa väärää informaatiota. Myös valemaalien käyttö on mahdollista: valemaalin osalta riittää, että rakennelman koko ja muoto ovat kohtalaisen lähellä haluttua alusluokkaa. Multispektraalinen kuvaaminen ja tutkakuvaaminen aiheuttavat tälle oman haasteensa, koska näissä tapauksissa kohteen säteilyn pitäisi heijastua kohteesta alusluokkaa vastaavalla tavalla myös näillä taajuusalueilla.

Tämän luvun perusteella voidaan arvioida, että alusten havaitseminen on mahdollista jopa noin 15 metrin resoluutiolla. Voidaan silti pitää todennäköisenä, että Venäjä ei käyttäisi asejärjestelmiään tunnistamatonta maalia kohtaan. Todennäköisesti luokitteluun vaadittu 4,5 metrin resoluutio on huomattavasti lähempänä maalittamisen vaatimuksia.

Suomen aluskaluston vähäisestä määrästä johtuen tunnistaminen on suhteellisen helppoa esimerkiksi aiemmin mainitun georeferoinnin avulla. Mikäli aluksen pituus on noin 80 metriä, on se miinalaiva tai jos sen pituus on noin 50 metriä, on kyseessä ohjusvene tai miinantorjunta-alus. Öljyntorjunta- ja monitoimialukset ovat pituudeltaan näiden väliltä, mutta niiden rungon muoto eroaa merkittävästi taistelualuksista. Niitä ei voi unohtaa maalittamisen kannalta, koska niiden mahdollinen toiminta taistelualusten huoltoaluksina saattaa olla erittäin tärkeässä osassa laivastojoukkojen suorituskyvyn ylläpitämisessä.

Alusten maalittamista voidaan arvioida liikkuvien ja paikallaan olevien alusten osalta. Käytännössä liikkuvan aluksen maalittaminen ei onnistu satelliittien avulla, koska siihen ei kyetä kuitenkaan vaikuttamaan millään täsmäasejärjestelmällä: suunnistavia asejärjestelmiä (satelliittipaikannuksen, inertiapaikannuksen tai maastonseurantatutkan avulla maalipisteeseen hakeutuvia) ei voida käyttää liikkuvia kohteita vastaan, tutkahakupäällä varustetut meritorjuntaohjukset eivät ero kohdetta saarista saariston sisällä ja tutkasäteilyyn hakeutuvat ohjukset toimivat ainoastaan, jos alus käyttää tutkaansa eli säteilee aktiivisesti. Vaikka jotain näistä asejärjestelmistä voitaisiinkin käyttää, saisi aiemmin arvioitu, pienimmillään tunnin tai jopa kahden tunnin aikaviive kuvaushetkestä aikaan maalitiedon vanhentumisen.

Ainoa mahdollisuus hyödyntää paikkatietoa liikkuvaa alusta kohtaan on suunnata ilmarynnäkkö sen mukaan. Tällöin ilma-alusten on lennettävä tarpeeksi lähelle kohdetta saadakseen aluksesta havainnon omilla sensoreillaan. Aluksia ei ole helppo löytää rynnäkkökoneen sensoreilla saaristosta, joten koneiden olisi tultava mahdollisesti saariston sisälle. Tätä taas ei voida

pitää kovin todennäköisenä pelkästään taistelualusten lamauttamiseksi, koska tässä tapauksessa vihollisen koneet tulisivat ilmatorjunnan kantamaan (hävittäjä- tai alusilmatorjunta). Tilanne on todennäköinen ainoastaan osana isompaa operaatiota, jolloin satelliittitiedustelu olisi myös todennäköisesti kohdistettu pääkohteeseen eikä yksittäisiä taistelualuksia kohtaan.

Paikallaan olevien alusten maalittamista voidaan arvioida eri tilanteissa, joita ovat satamassa oleva alus, ankkurissa oleva alus ja saareen tukeutunut alus. Satamassa olevan aluksen havaitseminen on kohtalaisen helppoa, koska kuvista täytyy tarkastella vain mahdolliset satamapaikat. Samoin ankkurissa olevan aluksen havaitseminen on helppoa, koska muutostulkinta on huomattavasti yksinkertaisempaa ja mahdollisia virhetekijöitä on vähemmän kuin saaren sivusta alusta etsittäessä. Saareen tukeutuneen aluksen löytäminen on todennäköisesti hankalinta, mutta todennäköisesti sekin kyetään löytämään.

Erityistapaus paikallaan olevan aluksen osalta on jäätalvi. Esimerkiksi ohjusveneet eivät kykene ajamaan jäissä, joten niiden maalittamiseen on aikaa erittäin runsaasti. Jäissä kulkevien alustenkin havaitseminen on huomattavasti avovesikautta helpompaa, koska käytetty väylä jää hyvin pitkäksi aikaa näkyviin avovetenä jään seassa. Talvikautena mahdollisten valemaalien käyttö ja harhauttaminen ovat avovesikautta merkittävämpiä alusten suojan kannalta.

Aluksen havaitseminen kaikissa tilanteissa on siis todennäköistä, mikäli kuvan analysointiin on käytettävissä tarpeeksi resursseja. Tärkeämpi kysymys onkin, että kuinka kauan tähän menee aikaa ja kuinka usein kuvaus voidaan toistaa.

5. VENÄJÄN RESURSSIT

Satelliittien laukaisu avaruuteen ei onnistu huomaamatta. Kiertoradan saavuttamiseksi tarvittava lähtönopeus vaatii nykyteknologialla huomattavan isoja kantoraketteja, joiden laukaisu kyetään havaitsemiaan pitkien matkojenkin päähän ja niitä kyetään seuraamaan tutkavalvonnalla. Laukaisut uutisoidaan yleensä myös kohtalaisen kattavasti sekä itse suorittajan että useiden avaruusteknologiaan keskittyneiden internet-sivustojen toimesta. Useat internet-sivustot ylläpitävät luetteloja kaikista laukaisuista. Luetteloissa on satelliittien laukaisujen lisäksi muun muassa tavarankuljetuksia kansainväliselle avaruusasemalla sekä muualle aurinkokuntaan lähetettyjen avaruusluotainten laukaisuja.

5.1 Käytössä olevat sotilassatelliitit

Tässä alaluvussa käsitellään Venäjän kuvaustiedustelusatelliitteja, joita voidaan arvioiden mukaan käyttää taistelualusten maalittamiseen. Edellisen luvun perusteella voidaan jättää huomioimatta satelliitit, joiden resoluution arvioidaan olevan yli viisi metriä.

Venäjän puolustusministeriöllä on tapana antaa lausunto onnistuneesta laukaisusta julkisuuteen. Sotilassatelliittien osalta lausunnoissa ei yleensä kerrota satelliitista mitään muuta kuin sille annettu nimi ja järjestysnumero. Venäjä on jatkanut sotilassatelliittien nimeämiskäytännössään Neuvostoliiton aikana käyttöön otettua Kosmos-nimikettä ja juoksevaa sarjanumerointia. Esimerkiksi joulukuussa 2015 Venäjän puolustusministeriö julkaisi lausunnon Kosmos-2513-satelliitin onnistuneesta toimittamisesta kiertoradalleen [76].

Vaikka Venäjä ei kerro julkisesti sotilassatelliittien laukaisujen yhteydessä, minkä tyyppinen satelliitti on kyseessä, pystytään satelliitin kiertoradan perusteella päättämään paljon sen käyttötarkoituksesta. Esimerkiksi kuvaustiedustelusatelliitit ovat usein matalilla naparadoilla, joilla saavutetaan koko maailman laajuinen kattavuus ja korkea resoluutio. Pääsääntöisesti voidaan todeta, että kaikki Venäjän matalilla kiertoradoilla toimivat tiedustelusatelliitit ovat operatiivisessa käytössä, koska kiertoradan ylläpitäminen edellyttää säännöllisten korjausten tekemistä tai satelliitti putoaa kitkan vaikutuksesta vähitellen takaisin maahan. Epäkunnossa olevan satelliitin radan ylläpitämiseen ei ole yleensä mitään syytä ja ne päästetään usein putoamaan takaisin maahan. Mikäli satelliitin ratakorkeus on ollut yli 500 km, voi kuitenkin kulua vuosia ennen kuin se putoaa takaisin Maahan.

Venäjällä ei vaikuta olevan tällä hetkellä käytössä vanhoja filmikapseleihin perustuvia optisia satelliitteja. Niitä on kuitenkin edelleen laukaistu ajoittain [36;77]. Tarkoituksena on todennä-

köisesti ollut muiden satelliittien kuvausvälien täydentäminen. Näiden laukaisu on edelleen mahdollista. Maalittamisen näkökulmasta nämä eivät muodosta merkittävää uhkaa, koska tiedonsiirtoyhteyksien puuttumisen takia kuvien toimitusviive muuttuu tunneista päiviksi tai jopa viikoiksi.

Viimeisin käytetty optinen satelliitti on ollut malliltaan Yantar-4K2M toiselta nimeltään Kobolt-M. Näiden erottaminen uudemmista elektro-optisista tai tutkasatelliiteista on ollut kohtalaisen helppoa niiden lentoradan perusteella, jonka ratakorkeus on ollut tyypillisesti alle 300 kilometriä [36; 77; 78]. Kiertoradan korkeutta on laskettu jopa alle 200 kilometriin kuvan resoluution parantamiseksi kuvauksen ajaksi [78]. Joko kiertoradan mataluudesta, filmikapselien määrästä tai näiden yhteisvaikutuksesta johtuen tyypillisesti satelliittien elinkaari on ollut kohtalaisen lyhyt. Satelliitti on ollut keskimäärin kiertoradalla vain noin 3–4 kuukautta ennen laskeutumistaan takaisin Maahan [36; 78]. Joidenkin arvioiden mukaan Venäjä on käyttänyt kaikki vanhat varastoissaan olevat optiset satelliitit ja siirtynyt kokonaan elektro-optisten ja tutkasatelliittien käyttöön [36]. Toisaalta samoja arvioita esitettiin muutama vuosi sitten, kun edellisestä laukaisusta oli useampi vuosi. Venäjä kuitenkin laukaisi uusia optisia satelliitteja vielä vuosina 2014 ja 2015 [36; 77].

Venäjällä arvioidaan olevan tällä hetkellä käytössään enintään viisi tiedustelukäyttöön tarkoitettua elektro-optista tai tutkasatelliittia. Arvio perustuu Venäjän viimeisen 15 vuoden aikana laukaisemiin sotilassatelliitteihin, joiden sopivuutta kuvaustiedusteluun on arvioitu tarkemmin liitteessä 6. Venäjä on näiden satelliittien lisäksi laukaissut muitakin satelliitteja tiedusteluun sopiville kiertoradoille ilman Kosmos-nimikettä. Nämä ovat kuitenkin suunnattu kaupalliseen tai tieteelliseen käyttöön, joten niiden käyttötarkoituksista on helppo löytää julkista tietoa valmistajan tai satelliittia operoivan organisaation kautta. Lähes puolet Venäjän sotilassatelliittien laukaisuista on ollut GLONASS-paikannusjärjestelmäsatelliitteja [79].

Kuvasta 32 nähdään näiden viiden satelliittiin keskeisimmät rataparametrit. COSPAR ID on Kansainvälisen avaruustutkimuksen komitean (Committee on Space Research) ja Yhdysvaltojen ilmailu- ja avaruushallinnon (NASA) käyttämä tunnistenumero satelliiteille. Tunnisteessa on ensimmäisenä satelliitin laukaisuvuosi, jonka jälkeinen numero kertoo monesko kyseisenä vuonna laukaistu satelliitti on. Mikäli samassa laukaisussa kiertoradalle toimitetaan useampi satelliitti, erotetaan ne viimeisenä olevalla kirjaimella (A, B, C). Inklinaatio on asteina ja apogeum sekä perigeum kilometreinä Maan pinnasta. RCS tarkoittaa satelliitin tutkapoikkipinta-alaa.

Nimike	COSPAR ID	Laukaistu	Inklinaatio	Apogeuum	Perigeuun	Eksentrisyys	RCS
Kosmos-2441	2008-037A	26.7.2008	97,96	733	708	0,0017784	20,95
Kosmos-2486	2013-028A	7.6.2013	98,20	723	710	0,0008859	16,26
Kosmos-2487	2013-032A	27.6.2013	74,72	480	472	0,0005328	7,95
Kosmos-2503	2015-009A	27.2.2015	97,68	577	565	0,0008865	5,72
Kosmos-2506	2015-029A	23.6.2015	98,27	727	706	0,0014538	15,04
Kosmos-2515	2016-020A	24.3.2016	97,64	594	549	0,0032913	-

Kuva 32. Venäjän kuvaustiedusteluun soveltuvien sotilassatelliittien tiedot [79]

Kuvasta 32 voidaan todeta myös, että satelliiteilla Kosmos-2441, Kosmos-2486 ja Kosmos-2506 on hyvin samankaltaiset kiertoradat. Useiden arvioiden mukaan nämä ovat kaikki Persona-tyypin elektro-optisia kuvaussatelliitteja [80; 81; 82; 83]. Kaikkien kolmen satelliitin samankaltainen kiertorata tukee näitä arvioita, koska tässä tapauksessa myös satelliittien sensorien suorituskyky on samankaltainen samoilla rataparametreilla. Venäjän avaruusjärjestön Roskosmoksen internet-sivuilla mainitaan, että toisen Persona-tiedustelusatelliitin laukaisu viivästyi vuodesta 2012 vuoteen 2013, mikä täsmää myös muihin arvioihin [84]

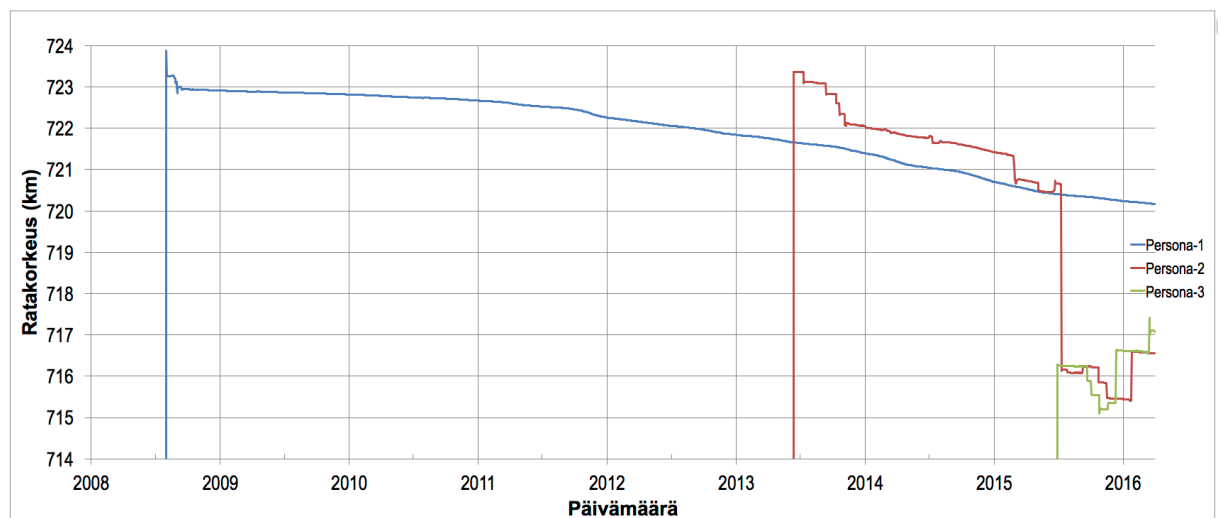
Satelliittien suorituskyvystä ei ole tarkkaa tietoa. Ratojen aurinkosynkronisuuden perusteella voidaan pitää hyvin todennäköisenä, että sensorit ovat elektro-optisia. Joidenkin arvioiden mukaan sensorin erottelukyky on alle metrin [80; 82; 85]. Satelliittien rungon arvellaan olevan TsSKB-Progress-yhtiön valmistama, joka valmistaa myös kaupallisessa ja tutkimuskäytössä olevia Resurs-satelliitteja [80; 82]. Venäläisten sanomalehtien mukaan TsSKB-Progress voitti tarjouskilpailun uuden satelliittityypin rakentamisesta vuonna 2000 ja sitä olisi alettu kehittämään edellä mainitun Resurs-tyypin pohjalta [85]. Satelliittien rungot ovat mahdollisesti tämän johdosta samankaltaisia, vaikka itse sensorin arvellaan kuitenkin olevan eri valmistajalta [80; 82].

Venäjän puolustusministeriö julkaisi Malaysian Airlinesin MH-17 lennon alasampumisen jälkeen tiedustelusatelliitin kuvan (kuva 33) tapaukseen liittyen. Kuvausajan perusteella sen arveltiin olevan Persona-2-satelliitin ottama [82]. Bellingcat-tutkimusryhmän raportti kuitenkin osoitti, että kuvausajasta todennäköisesti tarkoituksella valehdeltiin ja että kyseessä olisi todellisuudessa vanha kuva [86]. Vaikka kuvan ottaneesta satelliitista ei olekaan varmuutta, nähdään kuvasta joka tapauksessa resoluution olevan noin yhden metrin luokkaa tai parempi.



Kuva 33. Mahdollisesti Persona-satelliitin ottama kuva [82]

Ensimmäisen Persona-satelliitin toimintakuntoa on arvioitu paljon. Venäläiset sanomalehdet uutisoivat pian laukaisun jälkeen, että satelliitin elektroniikka olisi pettänyt jo muutaman kuukauden kuluttua ja satelliitti olisi ollut siitä asti toimintakyvytön [87; 88]. Kuvasta 34 nähdään kaikkien Persona-satelliittien kiertoratojen korkeus:

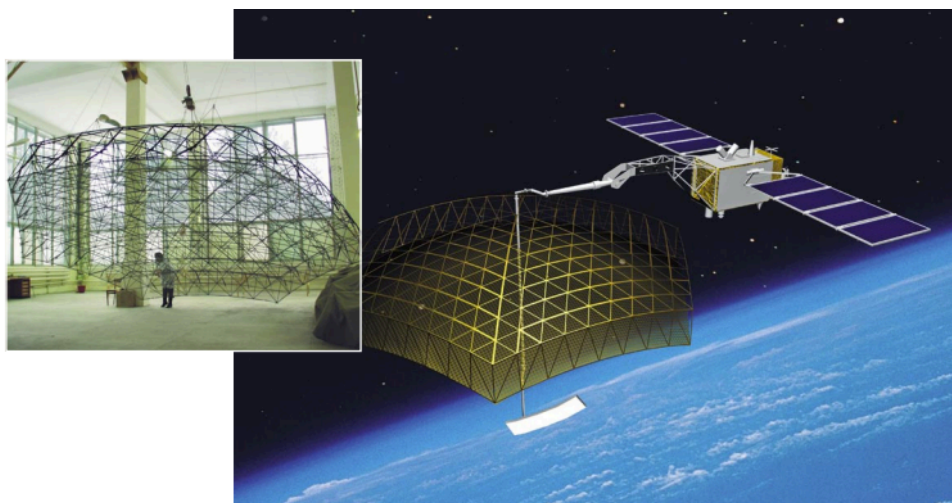


Kuva 34. Persona-satelliittien ratakorkeus ajan suhteen [89; 90; 91]

Persona-1-satelliitin rataa ei ole käytännössä muutettu kertaakaan kuluneen kahdeksan vuoden aikana vaan sen kiertorata on vähitellen alkanut vajota. Tuolla ratakorkeudella kitkan vaikutus on hyvin pieni ja sen vaikutus satelliitin ratanopeuden hidastumiseen sekä sitä kautta ratakorkeuden tippumiseen on hidasta. Sen sijaan Persona-2 ja -3-satelliittien kiertoratoja on muutettu hyvinkin aktiivisesti viimeisten vuosien aikana. Venäjän asevoimien yleisesikunnan päällikkö kenraali Valeri Gerasimov tiedotti lokakuussa 2015 maansa muuttaneen joidenkin satelliittien kiertoratoja tukeakseen paremmin omia operaatioitaan Syyriassa [92]. Persona-2- ja -3-satelliittien kiertoradat mahdollistavat nyt sen, että vähintään toinen satelliiteista kykenee

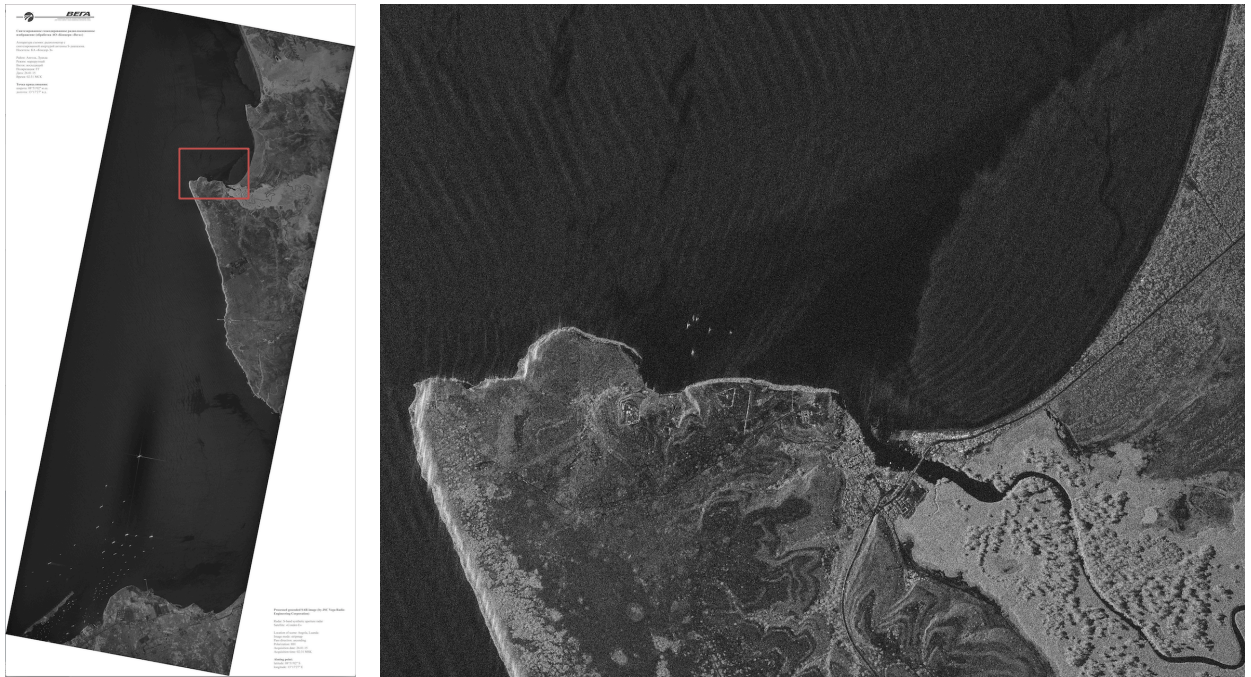
kuvaamaan Syyrian aluetta päivittäin valoisaan aikaan [93]. Uutisoinnin ja kiertoradan perusteella Persona 1-satelliitin toimimattomuutta voitaneen pitää varsin todennäköisenä. On epätodennäköistä, ettei Venäjä ei olisi kahdeksaan vuoteen muuttanut kyseisen satelliitin painopistealuetta kertaakaan, mikäli se olisi ollut mahdollista.

Kosmos-2487 arvioidaan olevan Kondor-tyypin tutkasatelliitti [94; 95; 96]. Venäjän avaruusjärjestön Roskosmoksen edustaja on myös julkisuudessa puhunut 27.6.2013 laukaistusta Kondor-satelliitista [97]. Sen uskotaan olevan kotimaan käyttöön tarkoitettu versio NPO Masinostrojenijan ulkomaan vientiin tarkoitetusta Kondor-E-satelliitista [94; 95]. Kondor-E-satelliitista on saatavilla sekä optisen alueen että tutka-alueen malli [98; 99]. Rataparametrien perusteella Kosmos-2487 on ainoa Venäjän kuvaussatelliiteista, joka ei ole aurinkosynkronisella radalla. Tästä syystä voidaan pitää todennäköisenä, että se on tutkasatelliitti, koska auringonvaloa ei tarvita tutkan toimintaan. Kondor-E-satelliitin ratakorkeudeksi mainitaan noin 500 km [98], mikä täsmää hyvin myös Kosmos-2487 kiertoradan korkeuteen ja tukee arvioita satelliitin tyypistä. Kuvassa 35 Kondor-E-satelliitti.



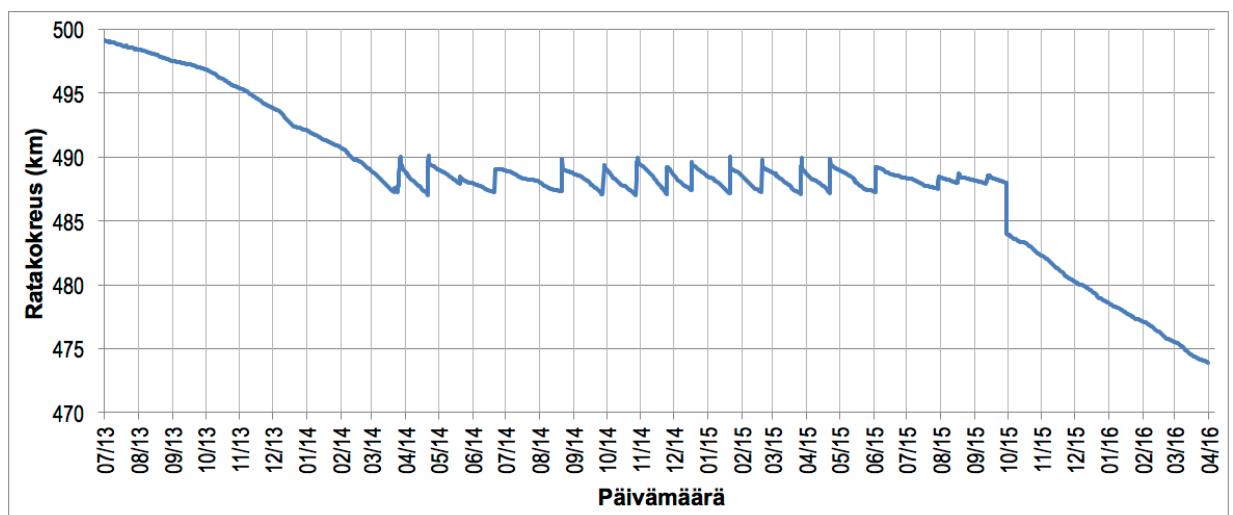
Kuva 35. Kondor-E-satelliitin tutkan antennin ja havainnekuva satelliitista avaruudessa [98]

Kondor-satelliitin suorituskyvystä ei ole tietoa, mutta sen voidaan olettaa olevan vähintään samaa tasoa kuin vientiin tarkoitettussa Kondor-E:ssä. Myöskään Kondor-E-satelliitin suorituskyvystä ei ole varmaa tietoa. Etelä-Afrikka on tällä hetkellä ainoa valtio, jolla satelliittityyppi on käytössä [100]. NPO Masinostrojenija kuitenkin ilmoittaa, että Kondor-E:n tutka toimii S-alueella (2–4 GHz) ja resoluutio on noin 1-2 metrin luokkaa [98]. Kuvauskulmaksi on ilmoitettu 20–55 astetta [98]. Sensorin valmistaja on NPO Vega, joka ilmoittaa tutkan aallonpituudeksi 9,5 cm ja polarisaatioksi vaaka- tai pystypolarisaation tutkan käyttömoodista riippuen [94B]. Kuvasta 36 voidaan nähdä, että Kondor-E-satelliitin resoluutio on varsin korkea. Satelliitin elinkaaren pituudeksi on ilmoitettu noin 5 vuotta [98].



Kuva 36. Kondor-E -satelliitin kuva Angolan rannikolta [101]

Myös Kondor-satelliitin todellista toimintakyvystä on erilaisia arvioita. Erään arvion mukaan satelliitin tutka on mennyt rikki vuoden 2014 aikana [94]. Vaikka tutkan epäkunnosta ei ole varmuutta sinänsä, niin satelliitin kiertoradan korkeuden muutos tukee tätä arviota (kuva 37).

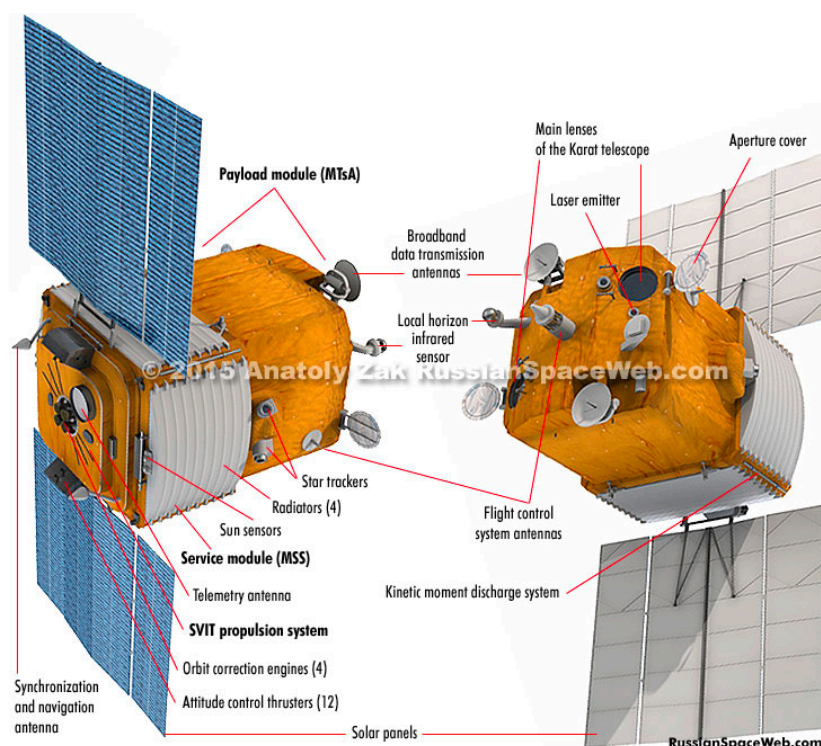


Kuva 37. Kondor-satelliitin ratakorkeus ajan suhteen [102]

Kuvasta 37 nähdään, että satelliitin ratakorkeutta on ylläpidetty nostamalla sitä noin kerran kuukaudessa helmikuusta 2014 syyskuuhun 2015, jolloin korkeutta tiputettiin äkillisesti noin 5 kilometriä. Tämän jälkeen kiertorata on tasaisesti laskenut ilman, että sitä olisi korjattu kertaakaan. Korkeuden lasku ei sinänsä ole kovin suuri, mutta mikäli sen annetaan jatkua, kiihtyy se ilmanvastuksen kasvaessa koko ajan. Arvion mukaan kiertoradan äkillinen pudotus ja sen jälkeinen korkeuden lasku saattaa olla merkki siitä, että satelliittia ei saatu korjattua ja nyt sen

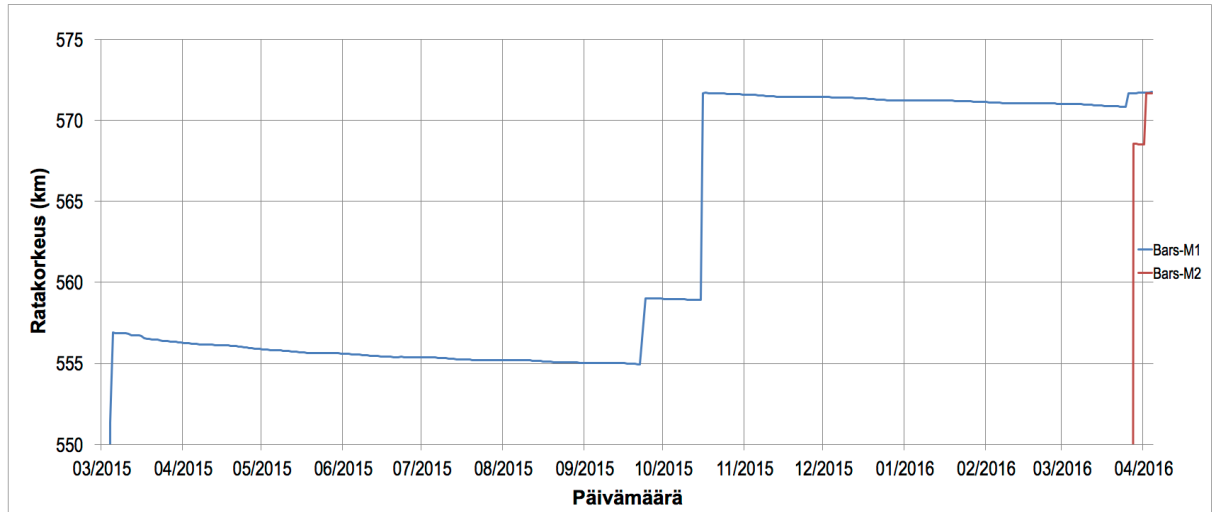
hallittua laskua takaisin Maahan valmistellaan [94]. On kuitenkin myös mahdollista, että satelliitti on edelleen toimintakunnossa ja Venäjä jossain vaiheessa alkaa uudestaan nostamaan ratakorkeutta. Mikäli näin ei kuitenkaan seuraavan vuoden kuluessa tapahdu, niin voidaan pitää todennäköisenä, että satelliitti on epäkunnossa.

Kosmos-2506 ja Kosmos-2515 -satelliittien arvellaan olevan Bars-M-tyypin elektro-optisia kuvaussatelliitteja [103; 104; 105; 107; 108]. Kaikki Venäjän valtionhankinnat on julkaistu sivustolle <http://zakupki.gov.ru> ja tarjouskilpailun kyseisen satelliittityypin valmistamisesta voitti TsSKB-Progres. Tällä hetkellä satelliitteja on laukaistu kaksi, mutta yhteensä niitä on ilmeisesti tilattu kuusi kappaletta. [103] Kuten Persona-satelliitteissa, sensorin uskotaan olevan LOMO:n (Leningradskoye Optiko Mechanicheskoye Obyedinenie) valmistama [103; 104]. Resoluution arvioidaan olevan metrin luokkaa [103]. Kuvassa 38 on eräs näkemys satelliitin ulkonäöstä ja komponenteista:



Kuva 38. Bars-M-satelliitti [103]

Varmistettua tietoa satelliitista on kohtalaisen vähän. Rataparametreista voidaan todeta, että kiertorata on aurinkosynkroninen molemmilla satelliiteilla [108; 109]. Kiertoratojen korkeus nähdään kuvasta 39. Kuvasta voidaan todeta myös, että Bars-M1:n ratakorkeutta on muutettu kahteen kertaan syksyllä 2015. Tämä saattaa olla osa aiemmin mainittua satelliittien kohdistamista tukemaan Syyrian operaatioita. Ajallisesti radanmuutokset ovat lähellä Persona-2- ja -3-satelliittien radanmuutoksia. Bars-M2 on laukaistu maaliskuun 2016 lopulla, joten sen ratakorkeuden muutokset viittaavat vain satelliitin toimittamiseen halutulle kiertoradalle.



Kuva 39. Bars-M-satelliittien ratakorkeus ajan suhteen [108; 109]

5.2 Kaupalliset satelliittipalvelut

Ensimmäinen kaupallinen kuvaussatelliitti oli vuonna 1972 laukaistu Yhdysvaltojen ERTS-1 (myöhemmin nimeltään Landsat-1). Satelliitin resoluutio oli vielä hyvin heikko verrattuna sotilassatelliitteihin. Ensimmäiset korkearesoluutioiset kuvat tulivat markkinoille vuonna 1992, kun Venäjän valtio tunnisti mahdollisuuden tuoda rahaa maahan ja vakauttaa siten valtiota Neuvostoliiton hajoamisen jälkeen. Näiden kuvien resoluutio oli rajoitettu kahteen metriin. Yhdysvallat vastasi tähän vuonna 1994 sallimalla siviiliyritysten rakentaa omia kuvaussatelliittejaan ja myydä näiden enintään metrin resoluutiolla ottamia kuvia. Venäjä seurasi muutamaa vuotta myöhemmin ja muutti vuonna 1999 oman resoluutorajansa myös yhteen metriin. [110] Sen jälkeen muun muassa Ranska, Saksa, Kanada, Israel, Intia, Pakistan, Brasilia, Kiina ja Etelä-Korea ovat sallineet sotilas- ja siviilisatelliittien kuvien myynnin [110; 111; 112]

Yhdysvallat alensi myöhemmin rajoitusta 50 cm resoluutioon ja vuonna 2014 vielä lisää 25 cm resoluutioon, mihin kaupalliset satelliittikuvien tarjoajat eivät vielä edes kykene [113]. Ranska rajoittaa edelleen resoluutionsa 50 cm tarkkuuteen, Saksa taas on poistanut kokonaan resoluutorajoituksensa, mutta pidättää silti vielä oikeuden estää kuvien myynnin, mikäli niistä voi olla haittaa valtion turvallisuudelle [112]. Venäjällä on ilmeisesti vielä voimassa metrin resoluutoraja, vaikka paineita muuttamiselle on ollut joidenkin lähteiden mukaan [114].

Erään arvion mukaan kaupallisten palveluiden suorituskyky on jo samalla tasolla tai jopa korkeammalla kuin sotilasjärjestelmillä [30]. Käytännössä kaupallisten kuvaussatelliittien resoluutorajoituksilla ei ole enää juurikaan merkitystä tarkasteltaessa satelliittien muodostamaa tiedustelu-uhkaa, koska resoluutio on rajoitettunakin tarpeeksi hyvä taistelualuksen havaitsemiseen. Venäjän osalta kaupallisten satelliittien hyödyntämisen saattaa kriisiaikana estää kaupallisen yrityksen kotimaa, koska moni näistä pidättää itsellään oikeuden rajoittaa kuvien myyntiä oman valtion turvallisuuden tai ulkopolitiikan nimissä [111; 112].

Esimerkiksi Ranska ja Saksa asettaisivat EU-maina rajoitteita Venäjää kohtaan, jos sillä olisi kriisi käynnissä toisen EU-maan (Suomi) kanssa. Voidaan pitää uskottavana, että myös Yhdysvallat toimisi samalla tavalla. Tätä tukee esimerkki vuodelta 1991, jolloin Irakille kieltäydettiin luovuttamasta SPOT- ja LANDSAT-satelliittien kuvia [33]. Myös Yhdistyneiden Kuningaskuntien Puolustusministeriö toteaa kaupallisten satelliittipalveluiden mahdollisen hyödyn, mutta samalla toteaa, ettei pyydettyä kuvamateriaalia ole välttämättä saatavilla aina sitä kautta [115].

Kauppapoliittisten syiden lisäksi toinen asia, joka todennäköisesti estää ulkomaisten kaupallisten satelliittipalveluiden käyttämisen on viive kuvausdatan toimittamisessa. Suurista palveluntarjoajista DigitalGlobe ja Airbus Defence&Space vaikuttavat olevan ainoita, jotka tarjoavat mahdollisuuden kuvamateriaalin suoraan lataukseen ftp-palvelimelta lähes reaaliaikaisesti [115; 116]. Muilla palveluntarjoajilla datan toimittamisessa tuntuu olevan pääsääntöisesti vuorokauden tai kahden viive, joka on liian pitkä maalittamiseen [54; 117].

Venäjälle jää kaupallisista toimijoista jäljelle aina luotettavana ja nopeana datan toimittajana oma kotimainen toimijansa eli Venäjän avaruusjärjestö Roskosmos. Roskosmoksella on viisi korkean resoluution elektro-optista satelliittia [84]. Näiden rataparametrit näkyvät kuvassa 40. Venäjä on julkisuudessa tuonut ilmi käyttäneensä kaupallisia satelliitteja kohteiden tiedusteluun Syyriassa [92; 93].

Nimike	COSPAR ID	Laukaistu	Inklinaatio	Apogeum	Perigeum	Eksentrisyys	RCS
Resurs-DK1	2006-021A	15.6.2006	69,94	565	558	0,0005173	8,65
Kanopus-V1	2012-039A	22.7.2012	97,47	507	505	0,0001961	1,88
Resurs-P1	2013-030A	25.6.2013	97,16	478	458	0,0017444	7,41
Resurs-P2	2014-087A	26.12.2014	97,28	474	462	0,0008731	8,48
Resurs-P3	2016-016A	13.3.2016	97,28	473	468	0,0003989	-

Kuva 40. Venäjän kuvaustiedusteluun soveltuvien kaupallisten satelliittien tiedot [62B]

Resurs-DK1 on TsSKB-Progressin valmistama ja Roskosmoksen operoima elektro-optinen satelliitti. Se on ylittänyt jo suunnitellun 3 vuoden elinkaarensa huomattavasti [118] Satelliitin kiertorata oli alkujaan elliptinen ($355 \text{ km} \times 573 \text{ km}$), mutta syksyllä 2010 perigeum nostettiin apogeumin tasolle. Tähän oli mahdollisesti syynä pyrkimys pidentää satelliitin elinkaarta. [119] Inklinaation takia satelliitti ei voi olla aurinkosynkronisella radalla. Satelliitin keskeiset tekniset tiedot nähdään taulukosta 3:

Taulukko 3. Resurs-DK1-satelliitin tekniset tiedot [118]

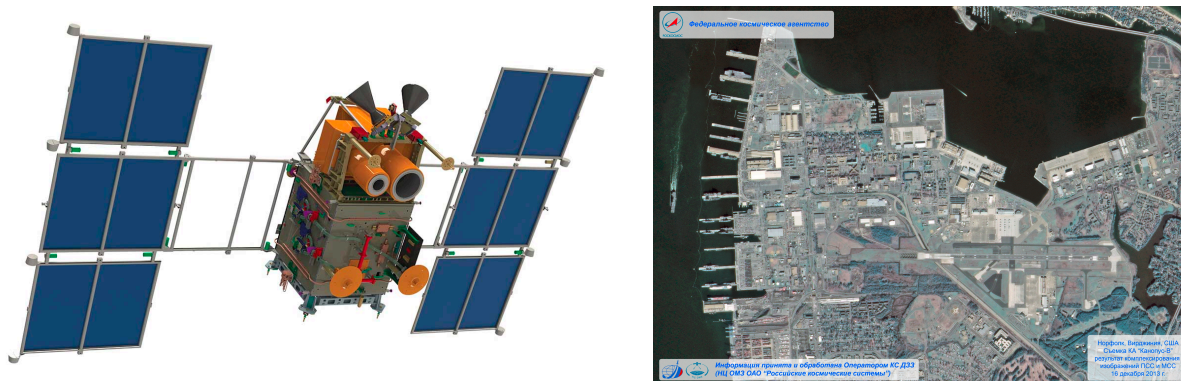
Resurs-DK1	
Rungon pituus	7,4 m
Rungon leveys	2,7 m
Aurinkokennojen pinta-ala	36 m ²
Massa	6570 kg
Tiedonsiirtonopeus	300 Mb/s
Optiikan polttoväli	4,0 m
Optiikan halkaisija	0,50 m
Kuvailmaisimen sensorelementin koko	9 μm
Resoluutio	Pankromaattinen 1,0 m - multispektraalinen 2–3 m

Resurs-DK1:n maksimikuvauskulma nadiirista on 30° [120]. Venäjän avaruusjärjestön alaisuudessa toimiva Koneenrakennuksen keskustutkimusinstituutti (TsNIIMASH) vastaa muun muassa satelliittien ratojen seurannasta ja hallinnasta. TsNIIMASH ilmoitti kuukausittain julkaisemassaan tapahtumaraportissa helmikuussa 2016, että Resurs-DK1:n kiertorataa ei enää ylläpidetä ja satelliitin sisäiset järjestelmät on poistettu käytöstä [121]. Ilmoitus tapahtui hie-
man ennen uusimman Resurs-P -satelliitin laukaisua maaliskuun puolessa välissä, joten todennäköisesti Resurs-P3-satelliitilla on tarkoitus korvata Resurs-DK1:n suorituskyky. Roskosmos ei ole kuitenkaan vielä virallisesti antanut lausuntoa satelliitin käytöstä poistamisesta.

Kanopus-V1 on NPP VNIIE:n valmistama ja Roskosmoksen operoima elektro-optinen satelliitti (kuva 41). Satelliitti kiertää aurinkosynkronisella radalla ja sen suunniteltu elinkaari on noin viisi vuotta. Satelliitin keskeiset tekniset tiedot nähdään taulukosta 4:

Taulukko 4. Kanopus-V1-satelliitin tekniset tiedot [122; 123;124]

Kanopus-V1	
Rungon pituus	2,2 m
Massa	450 kg
Tiedonsiirtonopeus	123 Mb/s
Optiikan polttoväli	pan 1,8 m – ms 0,36 m
Optiikan halkaisija	pan 0,35 m – ms 0,13 cm
Kuvailmaisimen sensorelementin koko	pan 7,4 μm – ms 18 μm
Resoluutio	pan 2,1 m – ms 10,5 m



Kuva 41. Kanopus-V1 ja satelliitin ottama kuva Norfolkista vuonna 2013 [125; 126]

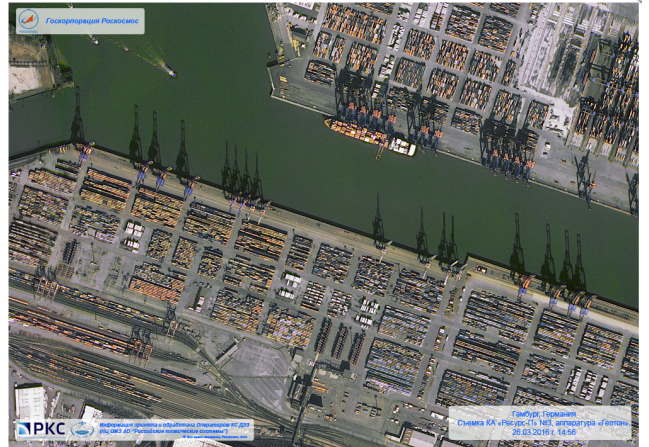
Vaikka satelliitin tutkapoikkipinta-ala ja paino ovat huomattavasti muita esillä olleita satelliitteja pienempiä, on satelliitin resoluutio kuitenkin kohtalaisen hyvä, kuten kuvasta 40 nähdään. Satelliitin maksimikuvauskulma nadiirista on 40° [127].

Resurs-P on myös TsSKB-Progressin valmistama ja Roskosmoksen operoima elektro-optinen satelliittityyppi (kuva 42). Se on uudempi versio Resurs-DK-satelliitista [128]. Satelliitin rungon uskotaan muistuttavan Persona-sotilassatelliittia, joka myös on kehitetty Resurs-DK-satelliitista. Satelliittien sensori on kuitenkin eri mallia. Satelliittityypin suunniteltu elinkaari on noin 5 vuotta [128; 129]. Tällä hetkellä kiertoradoilla on kolme Resurs-P-tyypin satelliittia, viimeisin näistä laukaistiin 13.3.2016 [130; 131]. Resurs-P3 ei tutkimuksen valmistuessa ollut vielä operatiivisessa käytössä, vaan sen testaus ja kalibrointi olivat kesken [132]. Kaikki kolme satelliittia toimivat aurinkosynkronisilla radoilla [129]. Satelliittityypin keskeiset tekniset tiedot nähdään taulukosta 5.

Taulukko 4. Resurs-P-satelliittityypin tekniset tiedot [128; 129; 133]

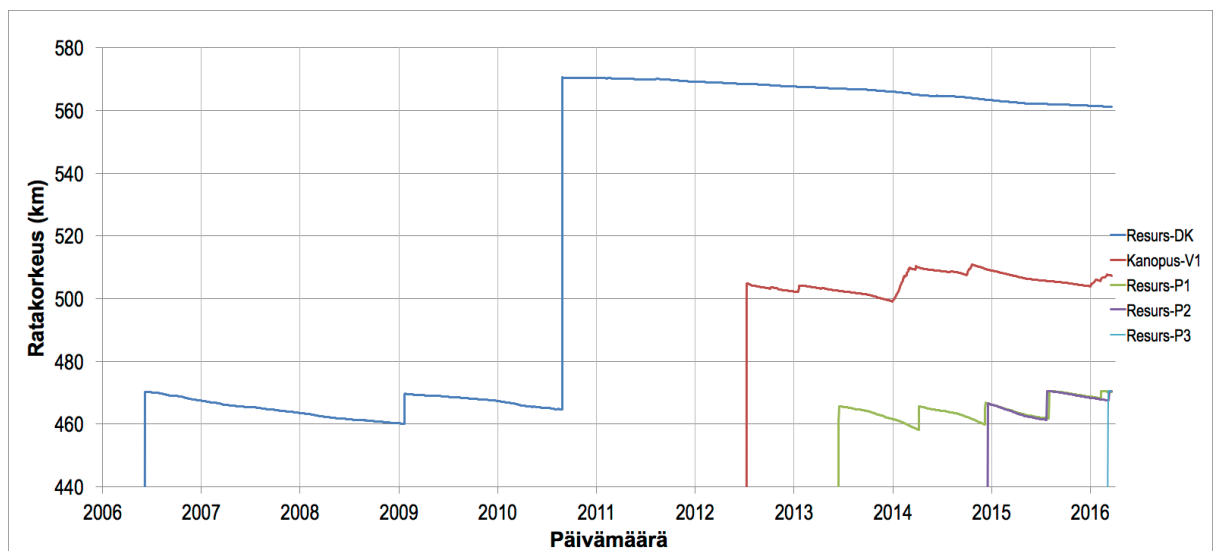
Resurs-P	
Rungon pituus	7,9 m
Rungon leveys	2,7 m
Aurinkokennojen koko / pinta-ala	$2 \times 5 \times 4 \text{ m} / 40 \text{ m}^2$
Massa	6390 kg
Tiedonsiirtonopeus	300 Mb/s
Optiikan polttoväli	4,0 m
Optiikan halkaisija	0,50 m
Kuvailmaisimen sensorelementin koko	$9 \mu\text{m}$
Resoluutio	pan 1,0 m - ms 3-4 m

Resurs-P -satelliiteissa on useita elektro-optisia sensoreita. Näistä kuitenkin ainoastaan Geoton-1 kykenee alle 10 metrin erottelukykyyyn [129]. Sensori on joko sama kuin Resurs-DK – satelliitissa tai hieman uudempi versio siitä [128; 129]. Kuvasta 42 pystytään erottamaan jopa henkilöautot. Satelliittien maksimikuvauskulma on 45° [133].



Kuva 42. Resurs-P-satelliitin havainnekuva ja P-3-satelliitin ottama kuva Hampurista vuonna 2016 [132; 140]

Venäjän kaupallisten satelliittien ratakorkeudet nähdään kuvasta 43. Muiden kun Resurs-DK1:n kiertoratoja ylläpidetään säännöllisesti, mutta toisin kuin sotilassatelliiteilla, suurempia kiertoradan muutoksia ei ole nähtävissä. Kuva on hieman harhaanjohtava Resurs-DK1:n alkuperäisen ratakorkeuden osalta, koska ratakorkeus on laskettu TLE-arvoista saatavan kiertoaajan mukaan ympyrän muotoiselle kiertoradalle. Resurs-DK1:n kiertorata oli alkujaan elliptinen, kunnes perigeum nostettiin noin 355 kilometristä samalle tasolle kuin apogeum (575 km) syksyllä 2010.



Kuva 43. Venäjän kaupallisten satelliittien ratakorkeudet [134; 135; 136; 137; 138]

5.3 Tulevaisuus

Sotilassatelliittien tulevista laukaisuista ei ole kovin paljon julkista tietoa saatavilla. Tämän hetkisestä satelliittityypeistä tiedetään ainoastaan se, että Bars-M-satelliitteja on tilattu neljä lisää. Siitä ei ole tietoa, onko tarkoituksena saada ne kaikki kiertoradoille yhtäaikaaisesti vai pitää muutamaa kiertoradalla ja täydentää uusilla satelliiteilla aiempien elinkaaren päättyessä. Mikäli uusien satelliittityyppien käyttöönotto olisi todennäköistä lähivuosien aikana, olisi niihin liittyviä hankintapyyntöä tai tarjouskilpailuja olisi todennäköisesti tullut myös julkisuuteen. On mahdollista, että rakentaminen olisi onnistuttu kokonaan salaamaan, mutta tarkasteltaessa muita Venäjän viime vuosien satelliittihankkeita tämä ei kovin ole todennäköistä. Todennäköisesti ainakaan seuraavan viiden vuoden kuluessa ei nähdä kokonaan uutta sotilaskäyttöön tarkoitettua kuvaussatelliittityyppiä.

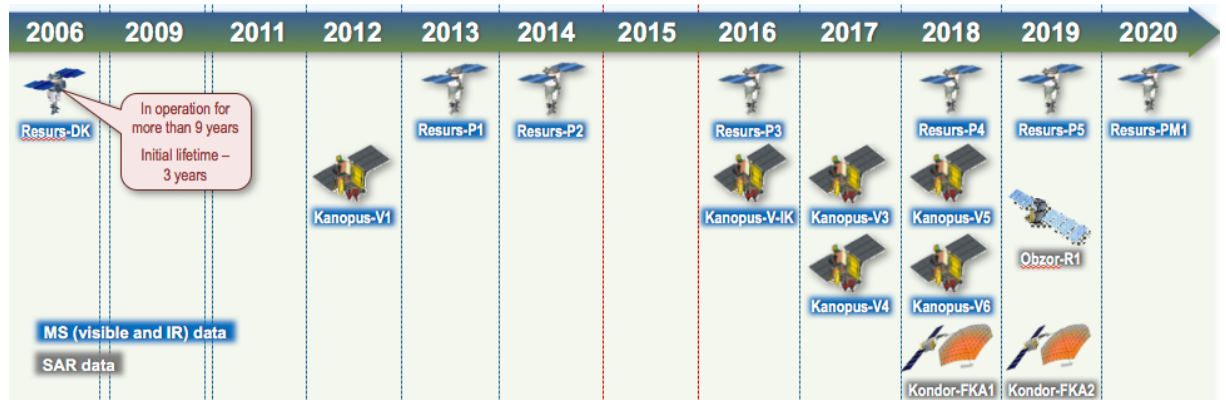
Vaikka Persona-1- ja Kondor-satelliitit toimisivatkin, voidaan niiden elinkaaren arvioida päättyvän vuosikymmenen vaihteessa. Persona-2- ja -3- sekä Bars-M1- ja -2-satelliitit voivat pysyä käytössä arviolta noin vuosiin 2020–2025 saakka. Samalla aikajänteellä on todennäköistä, että ainakin muutama uusi Bars-M -satelliitti laukaistaan. Sotilassatelliittien määrässä ei tule siis vuoteen 2025 mennessä todennäköisesti kovin merkittävää muutosta.

Kaupallisten satelliittien osalta Roskosmos on esitellyt tulevaisuuden suunnitelmia. On kuitenkin vaikeaa arvioida, kuinka suuri osa näistä toteutuu ja millä aikajänteellä. Avaruusteknologiahankkeissa on hyvin tyypillistä, että projektit viivästyvät tai rahoitus loppuu. Avaruuteen laukaisun jälkeen satelliitille ei voida enää tehdä korjauksia, joten kaiken on toimittava testeissä ennen laukaisua. Itse laukaisussa satelliittiin kohdistuu kovat voimat ja voimakas värinä, joka saattaa myös vahingoittaa järjestelmiä. Vaikka ohjelmistopäivitys olisi mahdollinen myös laukaisun jälkeen, on siinä riskinsä. Jos päivitys epäonnistuu ja satelliittiin ei enää sen jälkeen saada yhteyttä, on asiaa hyvin vaikea enää korjata jälkikäteen.

Esimerkiksi Persona-1- ja -2-satelliitit myöhästyivät alkuperäisestä laukaisuaajastaan noin vuodella [128]. Myös ensimmäinen Kanopus-V-satelliitti laukaistiin alkuperäisestä aikataulusta reilun vuoden myöhässä ja vuoden 2014 loppuun mennessä tarkoituksena oli laukaista yhteensä neljä Kanopus-V-tyypin satelliittia [140]. Näistä vuonna 2011 laukaistu on edelleen ainoa laukaistu. Vuoden 2015 lopulla laukaistiin merivalvontaan suunnattu Kanopus-ST-satelliitti, mutta laukaisu epäonnistui ja satelliitti putosi takaisin maahan [141].

Roskosmoksen odotetaan julkistavan Venäjän kansallisen avaruushjelman vuosille 2016–2025 kevään 2016 aikana. Ohjelma oli tarkoitus julkaista jo syksyllä 2015, mutta muun muassa budjettileikkaukset viivästyttivät julkaisua. Toistaiseksi venäläiset sanomalehdet ovat uutisoineet, että alustava budjetti ajanjaksolle olisi noin 42 miljardia euroa, mutta pudotettiin sittemmin noin 30 miljardiin euroon ja tämän jälkeen vielä noin 17 miljardiin euroon [142; 143]. Aikajaksolle suunnitellun 95 uuden satelliitin laukaisun sijasta satelliitteja laukaistaan 70 [144]. Tässä vaiheessa on kuitenkin vielä hyvin vaikea arvioida, miten laukaisumäärän vähentäminen vaikuttaa kuvaussatelliitteihin. On kuitenkin todennäköistä, ettei aivan kaikkia tämän hetken julkaistuissa suunnitelmissa olevia kuvaussatelliitteja ei tulla laukaisemaan.

Tämän hetkisten satelliittien elinkaari on suunniteltu pääsääntöisesti viisivuotiseksi ja polttoainetta kiertoradan ylläpitämiseksi ei todennäköisesti ole varattu paljon tätä pidemmäksi ajaksi. Yksi vaihtoehto on tietenkin nostaa satelliitit elinkaaren loppupäässä korkeammalle kiertoradalle kuten Resurs-DK1, jolloin radan korjaamisen tarve vähentyy. Mikäli Venäjä saa useita uusia satelliitteja käyttöönsä vuoteen 2020 mennessä, saattaa nykyisten elinkaari päättyä samoihin aikoihin. Mikäli uusia satelliitteja laukaistaan vain rajoitetusti, saatetaan elinkaarta pyrkiä venyttämään kuten Resurs-DK1:n tapauksessa.



Kuva 44. Venäjän kaupalliset kuvaussatelliitit vuoteen 2020 mennessä [142]

Kuvassa 44 näkyvässä suunnitelmassa ei ole huomioitu uusimpia budjetinleikkauksia. Kuvasta nähdään, että suunnitelmana on laukaista seitsemän uutta elektro-optista satelliittia ja kolme tutkasatelliittia vuoteen 2020 mennessä. Kanopus-V-IK poikkeaa tavallisista Kanopus-V-satelliiteista siten, että siinä on myös termisen infrapuna-alueen kuvaussensori. Tämän resoluutio on kuitenkin arviolta 10–15 metriä [143]. Resurs-PM on ilmeisesti uudempi versio nykyisestä Resurs-P-satelliittityypistä.

Kondor-FKA on siviilikäyttöön tarkoitettu versio Kondor-satelliitista ja sen resoluutioksi on ilmoitettu 1–2 metriä. Havainnekuvassa satelliitti näyttää hyvin samalta kuin Kondor-E-satelliitti. [122B] Ensimmäisen Kondor-FKA-satelliitin suunniteltu laukaisu on vasta vuonna 2018, joten todennäköisesti satelliitti ei ole vielä valmis. Obzor-R on kokonaan uusi satelliittityyppi. Sen resoluutioksi on ilmoitettu 1,0 metriä ja valmistaja on TsSKB-Progress [142; 144]. Toisen Obzor-R-satelliitin laukaisu on suunniteltu kuvan 48 aikajänteen ulkopuolelle, vuoteen 2021 [142]. Selkeä trendi näyttää olevan tutkasatelliittien lisääntyminen ainakin Venäjän kaupallisten satelliittien puolella. Seuraavien vuosien kuluessa voidaan arvioida paremmin, kuinka Venäjän uusi kansallinen avaruushjelma tulee lopulta toteutumaan.

Tutkasatelliittien lisääntymisen ohella toinen mahdollinen tulevaisuudensuuntaus on nykyisen tyyppisten satelliittien käytön lisäksi mikro- ja nanosatelliittien käytön lisääntyminen. Nämä jaetaan siten, että mikrosatelliitit ovat kooltaan noin 10–100 kg ja nanosatelliitit noin 1–10 kg [145; 146]. Pienten satelliittien kehitys pienentää avaruustekniikan kustannuksia merkittävästi sekä laukaisun että valmistuksen osalta. Kehityksen tuloksena avaruustekniikan käyttö laajenee sotilas- ja siviilipuolella erilaisissa tehtävissä sekä tämän ansiosta myös satelliittikonstellatiot ja laumasatelliitit yleistyvät. Nanosatelliittien rakentamisen, laukaisemisen ja operoinnin kustannukset ovat vain murto-osa perinteisten satelliittien kustannuksista, mikä mahdollistaa kokonaan uudentyyppisiä käyttötapoja avaruuslaitteille. Alun perin nanosatelliittien kehittäminen oli ensisijaisesti yliopistojen ja harrastajien harteilla, mutta nykyään myös lukuisat sotilasinstituutiot ovat mukana niiden kehityksessä. [145]

Kaupallisia piensatelliitteja on tarjolla jo nyt näkyvän valon ja infrapuna-alueen kuvausensoreilla varustettuina. Optiikan koko rajoittaa näiden kuvausresoluution toistaiseksi noin 3–4 metrin luokkaan. Tutka-alueen sensorien lisääminen nanosatelliitteihin on vielä nykyteknologialla haastavaa, koska satelliitin koko rajoittaa käytössä olevan energian määrää ja antennien kokoa. Avattavat aurinkopaneelit ja antennit mahdollistavat todennäköisesti tulevaisuudessa myös tutkalaitteiden käytön piensatelliiteilla. [145]

Yhdysvaltojen asevoimien tutkimusorganisaation (DARPA) SeeMe-projektissa tutkitaan vaihtoehtoa, joka voisi toimittaa kuvaa 90 minuutin varoitusajalla mistä tahansa maailman osasta. Tähän päästäisiin käyttämällä 24 satelliitin konstellatiota hyvin matalalla kiertoradalla, missä yksittäisen satelliitin elinikä olisi vain noin 90 päivää. Tämä olisi mielekästä vain, kun yksittäisen satelliitin hinta on tarpeeksi alhainen ja laukaisu edullista. Tällä hetkellä taktisen satelliitin tavoitehinta on noin 250 000 – 350 000 euroa. [145]

Satelliittiteknologia arkipäiväistyy ja halpenee merkittävästi sarjatuotannon ansiosta. Suuri murros saavutetaan kuitenkin vasta silloin kun tarjolla on tarpeeksi pieniä ja edullisia laukaisuratkaisuja. Edullisen laukaisun ja hintansa ansiosta piensatelliitti voidaan sijoittaa hyvin matalalle radalle, jolloin saavutetaan myös parempi kuvaustarkkuus pienemmällä optiikalla. Matalalla kiertoradalla on myös vähemmän elektroniikalle haitallista säteilyä, joten halvempien komponenttien käyttö on mahdollista. Tämä mahdollistaa taktisten satelliittien laukaisun ainoastaan silloin kun niitä tarvitaan. Näin voidaan säästää merkittävästi operointikustannuksista ja tarjota silti tarvittaessa reaaliaikaista tilannetietoa. Piensatelliitit tulevat toimimaan myös hyvin matalilla, alle 300 km, kiertoradoilla. Vaikka ilmakehän aiheuttama kitka rajoittaa satelliitin elinikää, kompensoi halpa hinta sen. [145]

Piensatelliitit eivät vielä tällä hetkellä muodosta uhkaa maanpuolustukselle, mutta satelliittiteknologian nopea kehitys on huomioitava uhkaa ja käyttömahdollisuuksia arvioitaessa [145]. Erään arvion mukaan mikrosatelliiteissa alle metrin resoluutioihin voitaisiin päästä jo 3–5 vuoden kuluessa [147]. Hieman pidemmän aikavälin tavoitteena on satelliitin yksikköhinnaksi noin 35 000 euroa [147].

6. SIMULOINTI

Aikaisempien lukujen ja satelliittien arvioitujen suorituskyykyjen perusteella voidaan pitää todennäköisenä, että paikallaan olevan taistelualuksen sijainti kyetään tiedustelemaan saaristosta. Taktisesta näkökulmasta oleellinen kysymys onkin, kuinka usein ja millaisella aikavii-veellä voidaan havaita. Aikaviiveen arviointi on hankalaa, koska se riippuu käytettävien tiedonsiirtoyhteyksien lisäksi myös henkilöstön käytettävyydestä, ammattitaidosta ja käytettävistä kuvantulkintamenetelmistä. Luvussa neljä kuitenkin arvioitiin tähän menevän nopeimmillaankin tunti.

Tässä luvussa tarkastellaan simuloinnin avulla aluksen mahdollista kuvaustiheyttä. Siinä on useita muuttujia, eikä tuloksia voida pitää yksiselitteisesti oikeina. Satelliittien rataparametreilla on suuri merkitys kuvausväliin ja niitä voidaan pitää varsin luotettavina. Suurimman epävarmuustekijän simulointiin aiheuttavat sensorien ominaisuudet, joista ei ole tarkkaa tietoa. Sensorin maksimiresoluutiolla ei ole suurta merkitystä tässä tutkimuksessa, koska arvion mukaan alle viiden metrin resoluutio on riittävä aluksen havaitsemiseen. Sen suurimmalla käytettävällä kuvauskulmalla ja optisen alueen satelliittien osalta auringon korkeuskulmalla kuvauskohteella on suuri merkitys simuloinnin tuloksiin.

6.1 Simuloinnin taustatiedot ja mallinnuksessa käytetyt arvot

Optisen alueen sotilassatelliittien suurinta kuvauskulmaa arvioitiin luvussa 3.1 ja simuloinnissa käytettäväksi maksimiarvoksi valittiin 52° . Tämä on hieman suurempi arvo kuin suurin osa kaupallisista korkearesoluutioisista kuvaussatelliiteista käyttää. Tästä aiheutuva virhe voi johtaa siis mahdollisesti todellisuutta tiheämpään kuvausväliin. Venäjän kaupallista satelliiteista Resurs-P-satelliittien suurin kuvauskulma on 45° ja Kanopus-V1:n suurin kuvauskulma 40° . Kaupallisten satelliittien osalta simuloinnissa käytettiin näitä arvoja. Tutkasatelliittien osalta täytyi määrittää sekä minimi- että maksimikuvauskulma. Simuloinnissa käytettäväksi minimiarvoksi valittiin 10° ja maksimiarvoksi 60° , jotka ovat tyypillisiä kuvauskulmia SAR-satelliiteille. Arvot ovat hieman suurempia kuin vientiin tarkoitetun Kondor-E:n kuvauskulmaksi ilmoitettu $20\text{--}55^\circ$. Tässäkin mahdollinen virhe siis todennäköisemmin tihentää kuvausväliä kuin harventaa sitä. Mahdollinen virhe pyrittiin tutkimuksessa suuntaamaan tähän suuntaan kahdesta syystä: toisaalta kohteena olevan aluksen kannalta on parempi, että skenaario antaa todellisuutta suuremman uhkakuvan kuin toisinpäin ja toisaalta on mahdollista, että sotilassatelliittien suorituskyyky on kaupallisia satelliitteja parempi.

Auringon korkeuskulman aiheuttama mahdollinen virhe kuvausväliin on huomattavasti pienempi kuin sensorin kuvauskulman vaikutus. Aurinko laskee kohtalaisen nopeasti ja ero siinä kykeneekö satelliitti kuvaamaan, jos auringon korkeus on 5 vai 10 astetta, on ajallisesti varsin pieni. Suurin merkitys tällä on talvikuukausina, jolloin optisen alueen satelliitit eivät kykene kuvaamaan lainkaan Suomen alueella. Silloin ero voi ratkaista sen, kykeneekö tietty satelliitti kuvaamaan ensimmäisen kerran tammikuun puolella välissä vai helmikuun alussa. Simuloinnissa käytettiin auringon korkeuskulman minimiarvona 7° luvun 3.1 arvioiden perusteella.

Kolmas mahdollinen virhetekijä simuloinnissa ovat käytetyt rataparametrit. Simuloinnissa käytettiin pääasiassa vuoden 2016 helmikuun lopulla haettuja rataparametreja, joiden tarkkuus kärsii siirryttäessä kauemmaksi kyseistä ajanhetkeä (liite 5). Simulointi suoritettiin koko vuoden 2016 ajalta, joten etenkin loppuvuoden osalta rataparametrien tarkkuus saattoi hieman kärsiä. Oletettavasti suurta osaa satelliittien radoista korjaillaan hieman halutun korkeuden ja aurinkosynkronisuuden ylläpitämiseksi. Nyt simuloinnissa ratoja ei korjattu, joten reilun puolen vuoden aikana satelliittien ratakorkeus pääsi laskemaan hieman todellisuutta enemmän. Ratakorkeuden muutoksen suuruus riippuu alkuperäisestä korkeudesta, mutta käytännössä sen voidaan todeta olevan noin puolella vuodessa vain joitain kilometrejä, joten siitä aiheutuva virhe simulointiin on vähäinen. Simulointia ei haluttu suorittaa vuoden 2015 rataparametreilla, jotka olisivat olleet saatavilla koko vuoden osalta, koska Venäjä muutti useiden satelliittien ratoja Syyrian operaation takia. Tämän takia vuoden 2015 alku- ja loppuvuoden radat eivät ole suoraan vertailtavissa ja tutkimuksessa haluttiin tarkastella myös vuodenaikojen vaikutusta kuvaustiheyteen.

Simuloinnin tulosten perusteella ei voida päätellä suoraan sitä, kuinka usein alusta tietyssä paikassa voidaan kuvata. Vaikka sensoria kääntämällä satelliitit kykenevät varsin suuriin kuvauskulmiin, eivät ne kykene kuvaamaan korkealla resoluutioilla kuin pienen osan niiden sensorin kuvauskulman kattamasta alueesta. Simuloinnissa ei otettu kantaa tähän todellisen kuvan kattamaan alueeseen. Sen koko riippuu esimerkiksi optisen alueen satelliittien osalta optiikan polttovälistä ja sensorelementin pikselimäärästä, joiden arviointi olisi ollut hyvin epävarmaa. Lisäksi satelliitin käyttäjä saattaa haluta kuvata peräkkäisillä ylityksillä joko täysin samaa aluetta muutosten havaitsemiseksi tai täysin eri aluetta muiden kohteiden havaitsemiseksi. Vaikka satelliitti kykenisi teoriassa kuvaamaan alusta kahdella peräkkäisellä ylityksellä, ei se välttämättä tarkoita sitä, että niin tehtäisiin käytännössä. Simulointi mallintaa ainoastaan mahdollisuutta kuvata tiettyä aluetta. Todellisuudessa ei liene todennäköistä, että kaikki kuvaussuoritukset kohdennettaisiin samalle alueelle.

Valoisuuden ja auringon korkeuskulman kannalta vuodessa on neljä erityistä ajankohtaa: kevä- ja syyspäiväntasauss sekä kesä- ja talvipäivänseisaus. Kevät- ja syyspäiväntasauksina aurinko on täsmälleen maan päiväntasaajan tason suunnassa, jolloin päivä ja yö ovat täsmälleen yhtä pitkiä. Kesäpäivänseisauksen aikaan aurinko on päiväntasaajan tasoon verrattuna mahdollisimman korkealla, eli valoisan ajan määrä vuorokaudessa on suurimmallaan. Talvipäivänseisauksen aikaan aurinko on taas mahdollisimman matalalla eli valoisan ajan määrä on pienimmillään. Talvipäivänseisauksen aikaan optisen alueen satelliitit eivät kykene kuvaamaan, koska aurinko ei nouse lainkaan yli 7 asteen korkeudelle Suomen leveyspiireillä. Vuosi voidaan jakaa karkeasti valoisuuden perusteella kuvan 45 mukaisesti:

20.3 Kevätpäiväntasaus				20.6 Kesäpäivänseisaus				22.9 Syyspäiväntasaus				21.12 Talvipäivänseisaus	
Tammikuu	Helmikuu	Maaliskuu	Huhtikuu	Toukokuu	Kesäkuu	Heinäkuu	Elokuu	Syyskuu	Lokakuu	Marraskuu	Joulukuu		
yli puolet ajasta pimeää, valon määrä lisääntyy				yli puolet ajasta valoisaa, valon määrä lisääntyy				yli puolet ajasta valoisaa, valon määrä vähenee				yli puolet ajasta pimeää, valon määrä vähenee	

Kuva 45. Valon määrän jakautuminen kuukausittain

Simuloinnissa jätettiin huomioimatta Resurs-DK1- ja Persona-1-satelliitit. Resurs-DK1 on ilmoituksen mukaan poistettu käytöstä ja Persona-1-satelliitin voidaan varsin suurella todennäköisyydellä arvioida olevan epäkunnossa. Simuloinnissa käytetyt satelliittien rataparametrit ovat esitetty liitteessä 5 ja satelliittien sensorit mallinnettiin seuraavasti:

Taulukko 6. Satelliittien simuloinnissa käytetyt tiedot ja arvot

Satelliitti	Sensorityyppi	Kuvauskulma	Tyyppi	Rajoitukset
Kondor	SAR	10° - 60°	Sotilaallinen	-
Persona-2	EO	0° - 52°	Sotilaallinen	Auringon korkeus > 7 °
Persona-3	EO	0° - 52°	Sotilaallinen	Auringon korkeus > 7 °
Bars-M1	EO	0° - 52°	Sotilaallinen	Auringon korkeus > 7 °
Bars-M2	EO	0° - 52°	Sotilaallinen	Auringon korkeus > 7 °
Resurs-P1	EO	0° - 45°	Kaupallinen	Auringon korkeus > 7 °
Resurs-P2	EO	0° - 45°	Kaupallinen	Auringon korkeus > 7 °
Resurs-P3	EO	0° - 45°	Kaupallinen	Auringon korkeus > 7 °
Kanopus-V1	EO	0° - 40°	Kaupallinen	Auringon korkeus > 7 °

Simuloinnissa ovat mukana koko vuoden 2016 osalta Bars-M2 ja Resurs-P3-satelliitit, vaikka ne laukaistiin vasta maaliskuussa 2016. Näiden poisjättäminen simuloinneista alkuvuoden osalta olisi toisaalta tehnyt tuloksista enemmän todenmukaisempia, mutta toisaalta vähemmän kiinnostavia. Tutkimuksen tulosten kannalta ei ole merkitystä, että mikä todellinen kuvauskyky on ollut menneisyydessä, vaan mikä on mahdollinen tai keskimääräinen uhka vuoden ai-

kana yleisellä tasolla. Nyt tulosten perusteella voidaan arvioida satelliittitiedustelukykyä myös alkuvuonna 2017. Kiertoradat muuttuvat hieman vuoden mittaan, joten tulokset eivät ole sellaisinaan täysin samoja eri vuosien välillä, vaikkakin samansuuntaisia.

Varsinainen simulointi suoritettiin Analytical Graphicsin System Tool Kit 11 -ohjelmistolla. Satelliittien kuvauskohteeksi valittiin piste Saaristomereltä WGS-84 mukaisilta koordinaateiltaan $\lambda = 60^\circ$ N ja $\phi = 22^\circ$ E. Valitulla pisteellä ei ole suurta merkitystä lähes koko Suomen etelärannikon ollessa leveyspiiriltään lähellä 60 astetta, jolloin myös valon määrä on samankaltainen. Kellon aikaan verrattuna pituuspiirin valinnalla on pieni merkitys, koska aurinko nousee aiemmin idästä ja myös laskee aiemmin idässä. Merkitys on kuitenkin pieni, koska valoisan ajan kokonaismäärä on ratkaisevaa ja se on kaikilla pituuspiireillä sama leveyspiirin pysyessä samana. Valittu kuvauskohde on Merivoimien keskeisellä toiminta-alueella Saaristomerellä ja myös kohtalaisen lähellä Utön säähavaintoasemaa, jonka säätilastoja hyödynnettiin jatkosimuloinnissa.

System Tool Kit (STK)-simuloinnista saatiin tulokseksi jokaisen satelliitin osalta kaikki ne ajankohdat, jolloin satelliitin kiertorata ja sensorin rajoitukset sekä kuvauskulma mahdollistivat kuvauksen määritettyyn koordinaattipisteeseen. Tulokset vietiin taulukkoina Exceliin niiden visualisoimiseksi ja jatkosimulointia varten.

STK-simuloinnin lisäksi Excelillä mallinnettiin sääolosuhteiden vaikutus kuvaustiheyteen. Käytännössä tämä tehtiin jakamalla koko vuosi vuorokausittain neljään kuuden tunnin ajanjaksoon eli 1464 (366×4) osaan, joista jokaiselle arvottiin satunnaisluvun avulla arvo ”aurinkoista” tai ”pilvistä”. Satunnaislukuarvonta oli painotettu Utön 30 vuoden ajan kuukausittaisen auringonpaistetuntien todennäköisyyden mukaan. Esimerkiksi tammikuun päivinä oli 81 % todennäköisyydellä pilvistä. Vuorokaudet jaettiin edellä mainittuun neljään osaan, koska ei ole realistista olettaa, että pilvisyyden vaihtuvan vain vuorokauden välein. Todellisuudessa pilvisyys voi vaihdella myös huomattavasti useammin kuin nyt simuloidun 6 tunnin välein, mutta tätä tutkimusta varten tarkkuutta voitaneen pitää riittävänä. Mikäli kiertoratojen simuloinnissa satelliitti oli kyennyt kuvaamaan tietyllä ajanhetkellä, mutta sääolosuhteiden simuloinnissa sama ajanhetki sai arvon ”pilvistä”, kuvaa ei kyetty ottamaan. Tämä jatkosimulointi toteutettiin jokaiselle satelliitille 100 kertaa koko vuoden ajalle ja laskettiin näistä vuorokausittaiset kuvauskertojen keskiarvot. Sääolosuhteiden simulointi toteutettiin vain optisen alueen satelliiteille.

6.2 Simuloinnin tulokset

Simuloinnista saadut tulokset kuukausittain ovat esitetty tarkemmin liitteessä 7. Tässä luvussa esitellään tulokset koko vuoden osalta yleisemmällä tasolla kuukausittaisina keskiarvoina. Tuloksissa keskitytään lähinnä optisen alueen satelliittien kuvausmahdollisuuksiin, koska tutkasatelliitin kuvausmahdollisuudet eivät riipu sää- tai valaisuolosuhteista. Tämän luvun simuloinnin tuloksia esittelevissä kuvissa ei ole huomioitu tutkasatelliitin kuvausmahdollisuuksia, vaikka osassa liitteen 7 kuvista myös ne ovat näkyvissä. Käytännössä tutkasatelliitti kykenee kuvaamaan kohdealuetta ympäri vuoden noin kahdeksan kertaa vuorokaudessa.

Taulukossa 7 teoreettisella kuvausmäärällä tarkoitetaan kaikkien optisen alueen satelliittien yhteenlaskettua mahdollista vuorokausittaista kuvausmäärää. Tästä poiketen todennäköisellä kuvausmäärällä ei tarkoiteta aivan samaa. Sillä tarkoitetaan keskiarvoa kuvausten määrästä, mikäli kuvaus ylipäättänsä onnistuu. Esimerkiksi tammikuussa todennäköisten kuvausten määrä on 4 / vrk ja yhden tai useamman kuvauksen onnistumisen todennäköisyys 27 %. Tämä tarkoittaa sitä, että satelliitit kykenevät todennäköisesti kuvaamaan tammikuussa vain joka neljäs päivä ja silloinkin todennäköisesti vain yhden tai kaksi kuvaa vuorokaudessa. Todennäköisin kuvausten lukumäärä vuorokaudessa on kuitenkin 4 / vrk, joka onnistuu keskimäärin noin viiden vuorokauden välein. Luvut ovat kuukausittaisia keskiarvoja, joten nopeasti katsottuna osa niistä voi vaikuttaa hieman ristiriitaisilta. Tämä johtuu osittain siitä, että valon määrän muuttuessa kuukauden aikana, kuvausmäärissä saattaa olla suuri ero kuun alun ja lopun välillä. Kuukauden sisäisiä vaihteluita tarkastellaan liitteessä 7. Esimerkiksi taulukossa XX on tammikuulle merkitty teoreettisten kuvausten lukumääräksi 6 / vrk ja silti ≥ 7 kuvausta onnistuu 2 % todennäköisyydellä. Tämä johtuu juuri keskiarvoista; tammikuun tapauksessa kuun viimeisen kolmanneksen aikana teoreettiset kuvausmahdollisuudet vaihtelevat vuorokausittain seitsemän ja 10 välillä.

Väli edellisen vuorokauden kuvaukseen tarkoittaa aikaa edellisen vuorokauden viimeisen kuvauksen ja seuraavan vuorokauden ensimmäisen kuvauksen välillä. Tämä on myös aikaväli, jolloin aluksia ei voida maalittaa optisen alueen satelliiteilla. Vuorokauden ensimmäisen ja viimeisen kuvauksen kellonajassa on huomioitu kaikkien satelliittien kuvausmahdollisuudet. Esimerkiksi marraskuussa kun ensimmäinen kuvaus on 10:30 ja viimeinen 12:30 sekä teoreettinen kuvausten määrä vuorokaudessa on viisi – tarkoittaa tämä sitä, että kaikki viisi kuvausmahdollisuutta ovat tuon kahden tunnin ajanjakson aikana.

Taulukko 7. Vuoden 2016 teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

	Teor. kuvausta / vrk	Pilvisyys valoisasta ajasta (%)	Todnäk. kuvausta / vrk	≥ 1 kuvaus onnistuu	≥ 3 kuvausta onnistuu	≥ 5 kuvausta onnistuu	≥ 7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	Vrk:n ensimmäinen kuvaus klo	Vrk:n viimeinen kuvaus
Tammikuu	6	81 %	4	23 %	20 %	10 %	2 %	21,25	11:45	14:30
Helmikuu	11	74 %	5	46 %	42 %	25 %	6 %	18,75	10:30	15:45
Maalikuu	11	62 %	5	63 %	59 %	34 %	12 %	18,75	9:45	15:00
Huhtikuu	12	51 %	5	74 %	71 %	28 %	18 %	17,75	9:45	16:00
Toukokuu	13	41 %	6	91 %	86 %	82 %	39 %	15,00	9:45	18:45
Kesäkuu	14	45 %	5	90 %	81 %	65 %	34 %	12,75	9:30	20:45
Heinäkuu	14	41 %	6	93 %	84 %	72 %	48 %	13,25	9:30	20:15
Elokuu	12	46 %	5	85 %	75 %	61 %	28 %	16,25	9:30	17:00
Syyskuu	12	65 %	5	60 %	43 %	35 %	13 %	18,50	9:00	14:30
Lokakuu	11	69 %	5	54 %	32 %	32 %	27 %	20,50	9:15	12:45
Marraskuu	5	85 %	3	32 %	17 %	8 %	0 %	21,75	10:30	12:30
Joulukuu	0	84 %	0	4 %	0 %	0 %	0 %			

Taulukosta 7 nähdään tammikuun olevan erittäin huonoa aikaa optisen alueen kuvaukselle. Kuvaus onnistuu keskimäärin joka neljäs tai viides päivä ja silloinkin kuvien määrä jää keskimäärin neljään. Päivän viimeisen ja seuraavan päivän ensimmäisen kuvausmahdollisuuden väliin jää keskimäärin noin 21,5 tuntia. Kaikki kuvausmahdollisuudet ovat vuorokausittain alkuiltapäivästä parin tunnin ajanjakson aikana.

Helmikuussa sekä valon määrä kasvaa että sääolosuhteet parantuvat. Nämä näkyvät teoreettisten kuvausmahdollisuuksien lukumäärän nousuna sekä myös kuvaustodennäköisyyksien kasvuna. Kohdealueesta saadaan lähes joka toinen päivä kolme tai neljä kuvaa, ja joka neljäs päivä yli viisi kuvaa. Aika vuorokausittaisten kuvausmahdollisuuksien välillä vähenee myös noin 19 tuntiin. Päivän kuvaukset sijoittuvat selkeästi pidemmälle ajanjaksolle, keskimäärin klo 10:30 ja 15:00 välille. Helmikuu on vielä huono kuukausi satelliittien kuvauksen kannalta, mutta selkeästi tammikuuta parempi.

Maaliskuussa kuvausolosuhteet paranevat edelleen. Nyt satelliitit kykenevät jo selkeästi useammin, kun joka toinen päivä kuvaamaan aluetta. Päivittäisiin kuvausaikoihin eikä aikaan vuorokausittaisten kuvausten välissä tule merkittäviä muutoksia helmikuuhun verrattuna. Huhtikuu on kevätpäivän tasauksen jälkeen, jolloin valoisaa aikaa on jo pimeää aikaa enemmän vuorokaudessa. Huhtikuussa satelliitit kykenevätkin jo lähes päivittäiseen kohdealueen kuvaukseen vähintään kolmella tai neljällä kuvauskerralla. Päivittäiset kuvausajat eivät kuitenkaan poikkea merkittävästi maalikuusta, mutta tämä johtuu satelliittien kiertoradoista. Valoisuuden puolesta kuvaaminen olisi mahdollista aloittaa jo aiemminkin. Huhti- ja maaliskuu ovat jo kohtalaista kuvausaikaa satelliiteille.

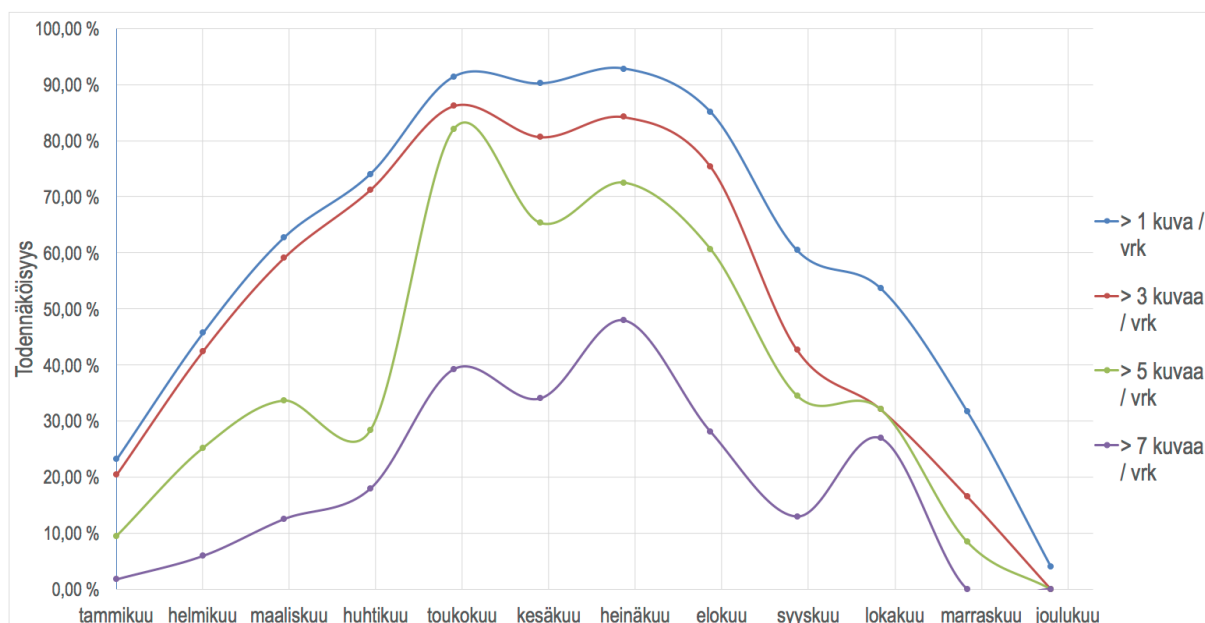
Touko- ja elokuun välinen aika on varsin hyvää kuvausaikaa satelliiteille. Päivittäin saadaan todennäköisesti yli viisi kuvaa kohdealueelta ja sääolosuhteet ovat kohtalaisen hyvät kaikkina kesäkuukausina. Parhaimmillaan vuorokauden ensimmäiset kuvat otetaan noin klo 09:30 ja viimeiset 20:30. Vuorokausittaisten kuvausten väliin jäävä aika vaihtelee noin 13 ja 16 tunnin välillä.

Syys- ja lokakuussa valon määrä alkaa taas vähetä ja sääolosuhteet heikentyä. Tämä näkyy kuvaustodennäköisyyksien laskuna. Kohdealuetta ei kyetä enää todennäköisesti kuvaamaan päivittäin, vaan keskimäärin noin joka toinen päivä. Niinä päivinä, kun sääolosuhteet mahdollistavat kuvauksen, saadaan kuitenkin vielä usein viisi tai useampi kuva vuorokaudessa. Aika vuorokausittaisten kuvausten välissä alkaa myös selkeästi jälleen kasvamaan ja kuvausajat keskittyvät jälleen lähemmäs puoltapäivää. Syys- ja lokakuu ovat satelliittien osalta kohtalais- ta kuvausaikaa.

Marraskuussa valon määrä laskee huomattavasti ja sääolosuhteet heikkenevät merkittävästi. Valon määrän lasku näkyy teoreettisten kuvausmahdollisuuksien laskuna, eivätkä kaikki satelliitit kykene enää marraskuussa kuvaamaan kohdealuetta edes kerran vuorokaudessa. Sää- olosuhteet mahdollistavat kuvauksen keskimäärin noin kerran kolmessa päivässä ja useampi kuin kolme kuvaa vuorokaudessa saadaan enää vain noin viiden päivän välein. Aika vuoro- kausittaisten kuvausten välissä lähestyy jälleen 24 tuntia, mikä näkyy myös päivän ensimmäi- sen ja viimeisen kuvausten ajankohtien keskittyessä jo hyvin lähelle puoltapäivää. Marraskuu on huonoa aikaa satelliittikuvaukselle Suomessa.

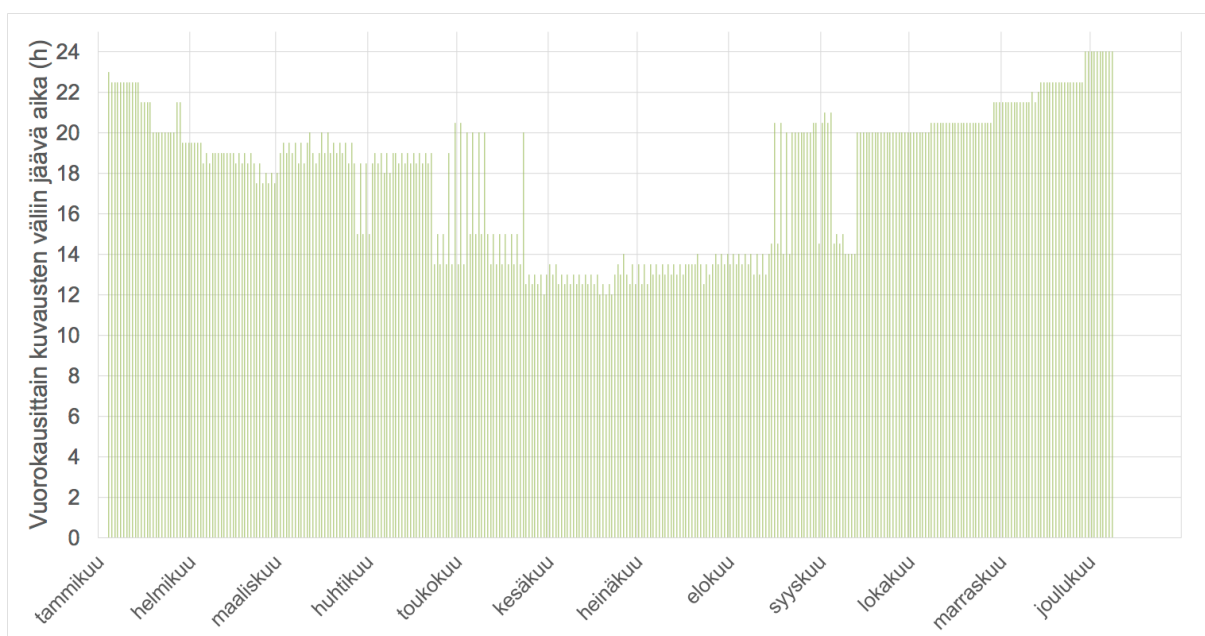
Joulukuussa optisen alueen satelliitit ovat käytännössä kykenemättömiä kuvaamaan Suomen alueella. Teoriassa alkukuusta yksi satelliitti ylittää vielä kohdealueen valoisaan aikaan, mutta sekin loppuu pian, kun aurinko ei enää nouse lainkaan yli seitsemän asteen korkeuskulmalle. Joulukuu on erittäin huonoa aikaa satelliittikuvaukselle.

Kuvasta 46 nähdään todennäköisyys kuvausten vuorokausittaiselle määrälle vuoden aikana. Hyvinä kuukausina (kesä-elokuu) suurella todennäköisyydellä kohdealueesta saadaan yli viisi kuvaa vuorokaudessa. Kevät- ja syyskuukausina todennäköisyydet laskevat ja talvikuukausina ne ovat lähellä nollaa. Kesäkuun todennäköisyyksissä oleva alenema johtuu tilastollisesti suu- remmasta pilvisyydestä (41 % \rightarrow 45 % \rightarrow 41 %) kuin touko- tai heinäkuussa, vaikka kesäkuu onkin esimerkiksi toukokuuta valoisampi kuukausi.



Kuva 46. Todennäköisyydet kuvaussuoritusten lukumäärälle vuoden aikana

Kuvasta 47 nähdään vuorokausittaisen kuvausvälin muuttuminen vuoden aikana. Talvikuu-kausina, kun kuvaukset ylipäätään onnistuvat, aika on hyvin lähellä 24 tuntia. Kesää kohti se laskee ja on parhaimmillaan kesä-elokuussa noin 13 tuntia. Näiden kolmen tai neljän kuukauden (mikäli toukokuu lasketaan mukaan, missä aika kiertoradoista johtuen vaihtelee merkittävästi) kuukauden ulkopuolella taistelualuksen näkökulmasta turvallista aikaa on siis vähintään noin 20 tuntia. Tämä mahdollistaa hyvin esimerkiksi henkilöstön levon ja aluksen huoltamisen ilman merkittävää uhkaa satelliittien suorittamasta maalittamisesta.



Kuva 47. Vuorokausittain kuvausten välille jäävä aika vuoden mittaan

Näidenkin kuvien perusteella voidaan siis todeta, että marras-helmikuun välinen aika on huo-noa, maaliskuu-huhtikuun sekä syys-lokakuun välinen aika välttävää ja touko-elokuun välinen aika hyvää satelliittikuvaukselle Suomessa.

Tutkasatelliitti lisäisi merkittävästi satelliittiedustelun suorituskykyä. Jopa kesäaikaan se todennäköisesti kaksinkertaistaa vuorokautisten kuvaussuoritusten lukumäärän. Mikäli Kondor ei ole toimintakykyinen, ei Venäjän satelliittiedustelun voida katsoa muodostavan tällä hetkellä merkittävää uhkaa Merivoimien aluksille. Viisi tai kuusi kuvaa vuorokaudessa parhaana vuodenaikana koko Etelä-Suomen alueelta ei todennäköisesti mahdollista taistelualusten etsimistä saaristosta. Kuvaussuorituksia voidaan käyttää mahdollisesti muilla perusteilla saatujen havaintojen varmistamiseksi ennalta tiedetyistä kohteista. Suoritusten määrä ei kuitenkaan mahdollista alusten etsimistä, jos paikka ei ole likimäärin tiedossa. Yhdellä korkearesoluutioisella kuvalla voidaan kattaa enintään noin $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ alue, todennäköisesti jopa vielä pienempi. Ei voida siis pitää kovin todennäköisenä sitä, että Venäjä käyttäisi montaa harvoista päivittäisistä kuvaussuorituksista taistelualusten maalittamiseen. Etenkään muina aikoina kuin touko-elokuussa, kun kuvaussuorituksia ei ole välttämättä edes päivittäin, ja kun niitä on, on käytettävissä sääolosuhteista riippuen keskimäärin 1–4 kuvauskertaa vuorokaudessa. On varsin epätodennäköistä, että kuvaussuoritukset kohdistettaisiin saaristoon, mikäli aluksista ei ole muuta havaintoa jo olemassa.

Satelliittien kiertoratoja muuttamalla suorituspäämäärä saataisiin nostettua kesäkuukausien ulkopuolella merkittävästi ainakin teoriassa, mutta sääolosuhteet vaikuttaisivat kuitenkin kuvausten toteutumiseen. Suomen olosuhteissa syys-huhtikuun välisenä aikana ylityksen pitäisi olla mahdollisimman lähellä puolta päivää ja taas touko-elokuun välissä mahdollisimman aikaisin aamulla. Näin lyhytkin valoisa aika saataisiin hyödynnettyä kuvaamiseen kesäkauden ulkopuolella ja kesäkaudella kuvia kyettäisiin ottamaan aamulla sekä illalla. Tämä edellyttäisi kuitenkin satelliittien ratojen muuttamista useita kertoja vuodessa.

Luvun 6 perusteella on varsin epätodennäköistä, että kaupallisten satelliittien kiertoratoja muutettaisiin. Näihin satelliitteihin ei myöskään ole välttämättä varattu merkittävästi ylimääräistä polttoainetta ratamuutosten tekemistä varten. Sotilassatelliittien ratojen muuttaminen on edellisestä poiketen varsin tyypillistä, mutta mikäli niitä muutettaisiin Suomen olosuhteisiin sopiviksi, eivät ne välttämättä olisi enää sopivia muille toiminta-alueille. Tämän takia on perusteltua olettaa, ettei Venäjä välttämättä muuttaisi kiertoratoja merkittävästi, vaikka sillä olisikin sotilasoperaatio Suomea vastaan käynnissä.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

7.1 Tutkimuskysymykset

Tutkimusongelmaan pyrittiin muodostamaan vastaus kolmen tutkimuskysymyksen avulla:

- *Miten satelliittien ratamekaniikka vaikuttaa satelliitin käytettävyyteen Suomen rannikolla?*
- *Miten satelliittien sensorityyppi vaikuttaa satelliitin käytettävyyteen Suomen olosuhteissa?*
- *Mikä on Venäjän kyky tiedustella aluskohteita Suomen rannikolla satelliittien avulla?*

Käytännössä kaikki korkean resoluution kuvaussatelliitit toimivat matalilla kiertoradoilla. Optisen alueen satelliiteilla matala kiertorata vaikuttaa suoraan optiikan kautta resoluutioon, kun taas tutkasatelliiteilla matalilla kiertoradoilla signaalin vaimeneminen on vähäisempää. Satelliittien ratamekaniikan osalta merkittävin tekijä satelliittien käytettävyydelle Suomen alueella on inkлинаatio. Mikäli satelliitin inkлинаatio on alle 60° , ei satelliittia voida käyttää Suomen alueiden kuvaamiseen. Toiseksi merkittäväksi tekijäksi nousee satelliitin radan aurinkosynkronisuus. Aurinkosynkronisia ratoja käyttämällä satelliitti saadaan ylittämään haluttu alue joka vuorokausi samaan kellonaikaan, ja varmistamaan riittävä valon määrä optisen alueen kuvauksessa. Satelliittien ratoja kyetään muuttamaan, mikäli tiedustelun painopistettä halutaan siirtää toiselle alueelle. Kaupallisilla satelliiteille kierto ratojen muuttaminen ei ole kovinkaan yleistä, mutta sotilassatelliittien tapauksessa kierto ratojen muuttamista esiintyy kohtuullisen usein. Kiertoradan muuttaminen kuluttaa satelliitin polttoainetta, jota tarvitaan kierto radan ylläpitämiseen. Tämän takia se myös saattaa lyhentää satelliitin elinkaarta.

Sensorityyppi vaikuttaa merkittävästi satelliitin käytettävyyteen Suomen olosuhteissa. Optisen alueen satelliitit soveltuvat kohtalaisen huonosti Suomen olosuhteisiin. Niillä kuvaaminen onnistuu hyvin huonosti tai ei lainkaan marraskuun puolestavälistä tammikuun puoleen väliin. Myös lokakuu ja helmikuu ovat optisen alueen kuvauksen osalta huonoa aikaa. Merkittävän tekijä tähän on valon puute, mutta myös sääolosuhteet ovat huonommat talviaikaan ja pilvisyys on yleisempää kuin kesällä. Maaliskuusta huhtikuuhun ja elokuusta syyskuuhun optisen alueen satelliittikuvaus onnistuu suurin piirtein yhtä hyvin Suomessa kuin eteläisimmillään alueilla (esimerkiksi Keski-Eurooppa, Välimeri, Pohjois-Afrikka). Kesäkuukausina (touko-, kesä- ja heinäkuu sekä elokuun alku) valoa on Suomessa jopa enemmän. Tämän takia touko-kuusta elokuun puoleen väliin optisen alueen satelliitit soveltuvat hyvin Suomen kuvaamiseen. Vuositasolla tämä tarkoittaa sitä, että lähes kolmasosa on huonoa aikaa, kolmasosa välttävää aikaa ja viimeinen kolmasosa hyvää aikaa optisen alueen satelliittien käytölle Suomen

alueella. Kokonaisuudessa voidaan siis todeta, etteivät optisen alueen satelliitit sovellu hyvin Suomen alueelle.

Yhdellä tutkasatelliitilla voidaan saavuttaa sama suorituskky, kun noin 6–8 optisen alueen satelliitilla. Sää- tai valaistusolosuhteet eivät vaikuta tutkasatelliittien toimintaan. Tämän takia ei voida sanoa, että tutkasatelliitin käytettävyys olisi Suomen olosuhteissa sen parempi kuin missään muualla. Optisen alueen satelliittien käytettävyys on kuitenkin huono Suomen olosuhteissa suuren osan vuodesta, joten voidaan todeta, että tutkasatelliittien käytettävyyden olevan niihin verrattuna erinomainen Suomen olosuhteissa.

Venäjän nykyinen satelliittiedustelukky perustuu pääasiallisesti optisen alueen kuvaussatelliitteihin. Lisäksi voidaan jopa varsin perustellusti epäillä, että Venäjän kaikki käytössä olevat satelliitit ovat optisen alueen kuvaussatelliitteja. Pelkästään jo tämän takia Venäjän kyky tiedustella kohteita Suomen alueelta satelliittien avulla on hyvin rajoittunut. Helmikuun lopun ja marraskuun alkupuolen välissä tiettyä kohtalaisen pientä aluetta voidaan kuvata onnistuneesti keskimäärin noin 3–7 kertaa vuorokaudessa. Samaan aikaan ei kuitenkaan voida kuvata muita kohteita kiertoradan samalta kohdalla. Lähes kaikki Venäjän satelliitit liikkuvat pohjois-eteläsuuntaisesti, jolloin yksi satelliitti kykenee kuvaamaan yhden ylityksen aikana vain yhden kohteen Etelä-Suomen rannikolta. Venäjä ei kykene näin vähäisillä kuvausmäärillä kuvaamaan Suomen rannikkoa laajamittaisesti ja etsimään sieltä Merivoimien taistelualuksia. Kuvattavan kohteen sijainnista täytyy todennäköisesti olla ainakin jonkinlainen ennakkotieto kuvauksen kohdistamiseksi oikealle alueelle. On myös varsin epätodennäköistä, että Venäjä kohdistaisi ainakaan suurta osaa käytettävissä olevista kuvauskerroista juuri Merivoimien taistelualuksia kohtaan. Suurempi hyöty saadaan esimerkiksi kuvaamalla kiinteiden kohteiden puolustusjärjestelyjä tai tunnettuja tukikohtia sekä varikkoja.

7.2 Tutkimusongelma ja johtopäätökset

Varsinainen tutkimusongelma oli: *Mikä on Venäjän satelliittitiedustelun uhka Merivoimien taistelualuksille?*

Taistelualuksen havaitsemisesta satelliitilla ei ole merkittävää hyötyä, jos tietoa ei voida hyödyntää mitenkään. Taistelualuksen näkökulmasta vaarallisin vaihtoehto on tiedon hyödyntäminen aluksen maalittamiseen. Liikkuvan aluksen maalittaminen ei onnistu nykyisillä asejärjestelmillä, joten uhka muodostuu lähinnä tukeutuneita aluksia kohtaan.

Aluksiin kohdistuvaa maalittamisen uhkaa kyetään pienentämään aluksen omin tai esimerkiksi Merivoimien Esikunnan ja Merivoimien Operaatiokeskuksen toimenpitein. MERIVOPKE voisi esimerkiksi ylläpitää simulaatiota Venäjän satelliittien kiertoradoista ja jakaa aluksille tiedon seuraavan vuorokauden tai seuraavan viikon aikana olevista satelliittien ylityksistä. Alus kykenisi varautumaan näihin mahdollisiin kuvauksiin olemalla niiden aikaan liikkeellä tai kiinni paikassa, johon ei ole tarkoitus jäädä pidemmäksi aikaa. Satelliittikuvauksesta mahdollisen asevaikutuksen käyttöön menee arviolta vähintään tunti, tai mahdollisesti jopa useampi. Vuorokauden viimeisen ja seuraavan vuorokauden ensimmäisen mahdollisen kuvauksen välissä on suurimman osan vuodesta vähintään 14 tuntia aikaa, jolloin alus on suojassa satelliittitiedustelulta. Myös tämä vuorokausittainen väli voitaisiin jakaa aluksille tietona, jolloin vuodenajasta riippuen jopa vuorokauden pituinen lepojakso olisi mahdollinen ilman satelliittitiedustelun uhkaa.

Alus kykenee myös itse tarkkailemaan satelliittitiedustelun uhkaa esimerkiksi sääolosuhteiden osalta. Selkeästi pilvisenä aikana satelliittikuvaus ei onnistu eikä alusta kohtaan täten myöskään muodostu uhkaa. Tukeutumisaikasta ei välttämättä tarvitse lähteä ennen satelliitin ylitystä, koska maalittamisessa tiedetään olevan viivettä. Ylityshetken mahdollinen pilvisyys voi poistaa alukseen kohdistuvan satelliittitiedustelun uhan ja saattaa mahdollistaa aluksen jäämisen tukeutumisaikkaan myös ylityksen jälkeen. Aluksella voidaan lisäksi tarkkailla auringon korkeuskulmaa ja jos se todetaan riittävän alhaiseksi, tiedetään myös, ettei kuvaus onnistu. Tämän arvioinnin riskit ovat kuitenkin suurempia kuin pilvisellä ilmalla, koska sensorin tarkkaa kykyä kuvata hämärissä olosuhteissa ei tiedetä.

Aluksen henkilöstön jaksaminen ja operatiivisen toiminnan kannalta satelliittien kuvausten välille jäävä aika riittänee hyvin henkilöstön lepoon sekä operatiivisen toiminnan rytmittämi-

seen ja suunnitteluun. Normaalioloissa tukeutumista saaren rantaan on harjoiteltu hyvin harvoin, joten siihen kuluva aika on vaikea arvioida tällä hetkellä. Tukeutumisen valmisteluihin tarvitaan kuitenkin koko henkilöstö, jolloin se on pois lepäämiseen tai huoltamiseen vaa-
dittavasta ajasta. Aluksen naamioimiselle ei välttämättä kuitenkaan ole tarvetta satelliittitiedustelu-uhan takia, koska se voidaan väistää olemalla liikkeessä päivittäisten ylitysten välinen ajanjakso ja siirtymällä tukeutumaan vuorokauden viimeisen kuvausmahdollisuuden jälkeen. Aluksen naamioimista saattavat toisaalta puoltaa muut tiedustelumenetelmät kuin satelliittitiedustelu, joita ei ole tässä tutkimuksessa arvioitu.

Venäjän satelliittitiedustelun uhka Merivoimien aluksia kohtaan on tällä hetkellä todennäköisesti varsin pieni ja aluksille voidaan määrittää kohtalaisen pitkät ajanjaksot, jolloin uhkaa ei muodostu lainkaan. Mikäli Venäjän ainoa SAR-satelliitti on toimintakuntoinen, on uhka selkeästi suurempi. Todellisuudessa kuitenkin alusten etsintäalue on niin suuri, ettei yhdestä tutkasatelliitista ole merkittävää hyötyä ilman ennakkotietoa, vaikka sen toisikin merkittävästi lisää vuorokausittaisia kuvaussuorituksia. Tutkasatelliitilla voidaan kuvata kaikissa sääolosuhteissa ja ympäri vuorokauden, jolloin myös aluksille määritetyt satelliittitiedustelulta turvalliset ajanjaksot ovat huomattavasti lyhyempiä. Tätä pohdintaa todennäköisempää on kuitenkin se, ettei Venäjän ainoa tämänhetkinen SAR-satelliitti ei ole toimintakunnossa.

Satelliittitiedustelun uhka tulee kasvamaan tulevaisuudessa. Venäjä on suunnitellut laukaistavansa seuraavan 10 vuoden kuluessa neljä uutta tutkasatelliittia. Pelkästään nämä kasvattavat kuvaussuoritusten vuorokausittaisen määrän moninkertaiseksi nykyiseen verrattuna. Näiden lisäksi myös uusia optisen alueen satelliitteja on suunniteltu laukaistavaksi. Muutaman optisen alueen satelliitin laukaisu ei nosta vielä merkittävästi satelliittitiedustelun uhkaa ja ensimmäinen uusista tutkasatelliiteista on suunniteltu laukaistavaksi vasta vuonna 2018, joten uhkataso pysynee matalana seuraavat pari vuotta. Tulevaisuudessa mahdolliset piensatelliittien verkostot voivat tarjota kustannustehokkaan ja kuvausmääriltään suuremman vaihtoehdon perinteisille kuvaussatelliiteille. Tällä hetkellä ne eivät kuitenkaan muodosta vielä sotilaallista uhkaa.

Tällä hetkellä lentokoneista ja miehittämättömistä lennokeista tapahtuva kuvaustiedustelu lienee satelliitteja suurempi uhka taistelualuksille. Näiden ennustaminen etukäteen on erittäin vaikeaa tai mahdotonta, joten aluksille ei voida määrittää satelliittien tavoin tiedustelulta turvallista aikaa. Lentokoneiden nousemisesta tai lähestymisestä voidaan saada ennakkovaroitus elektronisen tiedustelun tai ilmavalvonnan kautta, mutta etenkin pienet ja matalalla lentävät lennokit voivat muodostaa suuren tiedustelu-uhan.

7.3 Toimenpidesuositukset ja mahdolliset jatkotutkimusaiheet

Alla on lueteltu toimenpidesuositukset Merivoimille, mikäli Venäjän satelliittitiedustelu koetaan merkittäväksi uhaksi taistelualuksille:

- Ylläpidetään tietoisuutta Venäjän käytössä olevista satelliiteista (sotilas- ja kaupalliset kuvaussatelliitit) seuraamalla uusien satelliittien laukaisuja ja avaruudessa olevien satelliittien kiertoratojen muutoksia
- Seurataan sensoritekniikan kehittymistä elektro-optisten ja SAR-satelliittien näkökulmasta ja sitä, miten sen vaikuttaa satelliittien käytettävyyteen Suomen olosuhteissa
- Selvitetään modernien korkearesoluutioisten satelliittien todellista suorituskykyä alusten paikantamiseen ja maalittamiseen aikajänteeseen esimerkiksi ostamalla kuvaussuorituksia kaupallisilta toimijoilta ja analysoimalla kuvia
- Koulutetaan alushenkilöstöä satelliittien kyvyistä ja rajoituksista sekä mahdollisista keinoista tiedustelun väistämiseen
- Jaetaan operatiivisille taistelualuksille säännöllisesti tietoa Venäjän satelliittien tulevista ylityksistä (seuraavan päivän / seuraavan viikon aikana) ja arvioidaan ”tiedustelulta turvallisen” ajan kestoa vuorokausittaisten kuvausten välissä

Tutkimus käsitteli satelliittien muodostamaa tiedustelu-uhkaa lähinnä mahdollisten kuvaussuoritusten lukumäärän ja tiheyden kannalta, missä merkitsevä tekijä oli suurin käytettävä kuvauskulma. Resoluution vaikutusta aluksen havaitsemiseen ja kuvatun alueen kokoon vain sivuttiin, kuten myös kuvan tulkinnan kestoa ja tiedonsiirrosta aiheutuvaa viivettä. Esimerkiksi viive kuvauksesta aluksen havaitsemiseen olisi kiinnostava jatkotutkimuksen aihe, jossa voitaisiin tarkastella sekä kuvantulkintaa että tiedonsiirtonopeuksia. Tämän tutkimuksen laajuudessa näihin kysymyksiin ei olisi kyetty vastaamaan.

STK-ohjelmisto mahdollistaa myös satelliittien kiertoratojen ja kuvausmahdollisuuksien simuloinnin liikkuvien kohteiden suhteen (vrt. tässä tutkimuksessa kiinteä kohde). Sillä kyettäisiin esimerkiksi simuloimaan satelliittien tiedustelumahdollisuudet jotain tiettyä Merivoimien operaatioita kohtaan, kun operaation aika ja alusten liikkeet olisivat tiedossa. Tätä kyettäisiin esimerkiksi harjoittelemaan Merivoimien sotaharjoitusten yhteydessä. Harjoituksiin voitaisiin myös määrittää simuloimalla tiedustelusatelliittien kuvausmahdollisuudet tietylle alueelle ja seurata, miten tiedustelun väistäminen vaikuttaisi taistelualuksen operatiiviseen rytmiin ja toimintaan. Liikkuvien kohteiden havaitsemisen osalta ei välttämättä arvioitaisi maalittamista, vaan esimerkiksi Merivoimien operaation tai joukkojen siirtojen paljastumista.

Edelliseen perustuen mahdollisia, mielenkiintoisia jatkotutkimuksen aiheita voisivat olla esimerkiksi:

- Riittävän resoluution määrittäminen maastoutetun aluksen havaitsemiseen eri olosuhteissa
- Tehokkaimmat kuvan tulkinnan menetelmät saaristo-olosuhteissa (esimerkiksi vedenkorkeuden tai kuvauskulman muutoksen vaikutus muutostulkinnassa tai rannan läheisyydessä olevien puiden varjojen vaikutus tukeutuneen aluksen havaitsemiseen)
- Alusten löytymisen todennäköisyys saaristosta määrältään rajatuilla kuvauskerroilla pientä kuva-alaa käyttäen (korkeasta resoluutiosta johtuen)
- Aikaviive kuvauksesta aluksen havaitsemiseen
- Venäjän tuleva suorituskyky (jos esimerkiksi suunnitellut neljä tutkasatelliittia toteutuvat)
- Pienoissatelliittien sotilaalliset käyttömahdollisuudet tulevaisuudessa
- SAR-satelliitin kuvauksen havaitsemismahdollisuus taistelualuksen elektronisen tiedustelun järjestelmillä

Edellä mainituista etenkin viimeinen on mielenkiintoinen Venäjän tutkasatelliittien määrän kasvaessa. Taistelualusten omasuojajärjestelmään kuuluu usein tutkataajuusalueen lähetykset havaitseva tiedustelu- tai varoitusjärjestelmä. Mikäli tällä kyettäisiin havaitsemaan SAR-satelliitin lähetys, kykenisi alus määrittämään ylityshetkellä sen onko kuvausta tapahtunut vai ei. Jos kuvausta ei olisi suoritettu, voisi alus edelleen jäädä tukeutuneeksi ilman maalittamisen uhkaa. Ongelmaksi tämän havaitsemisessa voi muodostua liian heikko signaali suuresta etäisyydestä johtuen tai omasuojajärjestelmien antennien suuntaavuus, jos järjestelmät on suunniteltu havaitsemaan vain matalammilta korkeuskulmilta tulevat lähetykset.

LÄHTEET

- 1 Lappalainen, E. & Jormakka J. *Tekniset tutkimusmenetelmät Maanpuolustuskorkeakoulussa*. 1. painos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikanlaitos, 2004. ISBN 951-25-1540-7.
- 2 Hirsjärvi, S et al. *Tutki ja kirjoita*. 11. painos. Jyväskylä: Kirjayhtymä Oy, 1997. ISBN 951-26-5113-0.
- 3 Lempiäinen, J. *Taistelun ja logistiikan simulointi*. 1. painos. Ylöjärvi: Puolustusvoimien Teknillinen Tutkimuslaitos, 2005. ISBN 951-25-1606-3
- 4 STO-TR-MSG-088 AC/323(MSG-088)TP/548. Data Farming in Support of NATO. Ranska: NATO & Science and Technology Organization. 226 s. ISBN 978-92-837-0205-4
- 5 Analytical Graphics Inc. *System Tool Kit*. [viitattu 10.10.2015]. Saatavilla: <http://www.agi.com/products/stk/>
- 6 Dowman, I. et al. *High Resolution Optical Satellite Imagery*. 1. painos. Dunbeath: Whittles Publishing, 2012. ISBN 978-184995-046-6.
- 7 The Development, Concepts and Doctrine Center. *Protecting access to space*. Shrivenham: Ministry of Defence , 2012.
- 8 Noeys. D. Characterization of the Effects of a Sun-synchronous Orbit Slot Architecture on the Earth's Orvital Debris Environment. Diplomityö. San Luis Obispo, 2013- California Polytechnic State University, Master of Science in Aerospace Engineering. 48 s. Saatavilla: <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2121&context=theses>
- 9 Ito, A. *Studies in Space Law, Volume 5, Legal Aspects of Satellite Remote Sensing*. 1. painos. Boston: Martinus Nijhoff Publihers, 2011. ISBN 978-90-04-19032-0.
- 10 The Development, Concepts and Doctrine Center. *The UK Military Space Primer*. Shrivenham: Ministry of Defence , 2010.
- 11 Wright, D. & al. *The Physics of Space Security*. Massachusetts, American Academy of Arts and Sciences, 2005. ISBN 0-87724-047-7.
- 12 Joint Publication 3-14. *Space Operations*. US Joint Chiefs of Staff. Yhdysvallat, 2013. 135 s.
- 12 Joint Doctrine Publication 0-30. *UK Air and Space Doctrine*. Shrivenham: Ministry of Defence, 2013.
- 13 National Aeronautics and Space Administration. Three Classes of Orbit. [viitattu 10.10.2015]. Saatavilla: <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/OrbitsCatalog/page2.php>
- 14 Capderou, M. *Satellites, Orbits and Missions*. 1. painos. Ranska: Springer-Verlag France, 2005. ISBN 2-287-21317-1.
- 15 Air Command and Staff College. *Space Primer*. 1. painos. Montana: Air University Press, 2009. ISBN: 978-1-58566-194-7
- 16 Schowengerdt, R. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. 3. painos. San Diego: Elsevier, 2007.

- 17 Pisacane, V. *Fundamentals of Space Systems*. 2 painos. New York: Oxford University Press, 2005. ISBN 978-0-19-516205-9.
- 18 Chobotov, V. *Orbital Mechanics*. 3. painos. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002. ISBN 1-56347-537-5.
- 19 Kumar, N. Satellites and Orbits. [viitattu 11.10.2015]. Saatavilla: <http://nptel.ac.in/courses/105108077/module2/lecture6.pdf>
- 20 Maini, A. & Agrawal, V. *Satellite Technology: Principles and Applications*. 2. painos. London: John Wiley & Sons Ltd, 2011. ISBN 978-0-470-66024-9
- 21 Törmä, Markus. Kaukokartoituksen yleiskurssi Maa-57.351. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: http://foto.hut.fi/~markus/Teaching/kkyk/maa57351_2006_01.ppt
- 22 Satellite orbits. [viitattu 10.2.2016]. Saatavilla: http://www.geo.mtu.edu/~scarn/teaching/GE4250/satellite_lecture.pdf
- 23 Brown, Charles. *Elements of Spacecraft Design*. 1. painos. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2002. ISBN 1-56347-524-3.
- 24 Aguirre, Miguel. *Introduction to Space Systems: Design and Synthesis*. 1.painos. New York: Springer, 2013. ISBN 978-1-4614-3757-4.
- 25 Oregon State University. Remote Sensing of the Environment Geosciences 444/544. [viitattu 16.9.2015]. Saatavilla: http://www.geo.oregonstate.edu/classes/geo444_544/LECTURES/lectures_list.html
- 26 Säkkinen, J. *SAR-satelliittien hyödyntäminen Merivalvonnassa*. EUK-tutkielma. Helsinki, 2011. Maanpuolustuskorkeakoulu, Taktiikan laitos. 43 s.
- 27 Tolvanen, P. *SAR-satelliitin sotilaalliset käyttömahdollisuudet Suomessa*. EUK-tutkielma. Helsinki, 2008. Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos. 33 s.
- 28 Fortescue, P et al. *Spacecraft Systems Engineering*. 4. painos. Chichester: John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-75012-4.
- 29 Field Manual 3-14. *Space Support to Army Operations*. Washington D.C: Department of the Army, 2005. 130 s.
- 30 The Development, Concepts and Doctrine Center. *Space: Dependencies, Vulnerabilities and Threats*. Shrivenham: Ministry of Defence , 2012.
- 31 AJP-3.3(A). *Allied Joint Doctrine for Air and Space Operations*. Bryssel: North Atlantic Treaty Organization, 2009.
- 32 Space Weather Monitor. Space Debris: Time to Clean the Sky. [viitattu 16.9.2015]. Saatavilla: <http://spaceweathermonitor.com/2011/09/02/space-debris-time-to-clean-up-the-sky/>
- 33 Watts, B. *The Military Use of Space: A Diagnostic Assessment*. Washington D.C: The Center for Strategic and Budgetary Assessments, 2001.
- 34 O'Hanlon, M. *Neither Star Wars nor Sanctuary: Constraining the Military Uses of Space*. 1. painos. Washington D.C: The Brookings Institution, 2004. ISBN 0-8157-6456-1.
- 35 Norris, P. *Spies in the Sky: Surveillance Satellite in War and Peace*. 1. painos. Chichester: Praxis Publishing Ltd, 2008. ISBN 978-0-387-71672-5.

- 36 Krebs, Gunter. *Yantar-4K2M (Kobalt-M)*. [viitattu 15.3.3.2016]. Saatavilla: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/yantar-4k2m.htm
- 37 Pikkarainen, J. *Hyperspektrisen kaukokartoitusdatan analysointialgoritmeja*. Pro gradu. Tikkakoski, 2003. Jyväskylän yliopisto, Fysiikan laitos. 86 s.
- 38 European Space Agency. *Sentinel-2 User Handbook*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook
- 39 Geosage. *Image Fusion*. [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla: <http://www.geosage.com/highview/imagefusion.html>
- 40 Kosola, J. & Solante, T. *Digitaalinen Taistelukenttä: informaatioajan sotakoneen tekniikka*. 3. painos. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos 2010. ISBN 978-951-25-2503-4.
- 41 Drigger, R. Et al. *Introduction to Infrared and Electro-Optical Systems*. 2. painos. Boston, Arctech House, 2012. ISBN: 978-1-60807-100-5.
- 42 Olsen, R.C. *Remote Sensing from Air and Space*. 1. painos. Washington: SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007. ISBN 978-0-8194-6235-0.
- 43 Dolken, D. *A Deployable Telescope for Sub-Meter Resolutions from MicroSatellite Platforms*. Diplomityö. Delft, 2015. Delft University of Technology. Department of Space Engineering. 115 s.
- 44 European Space Agency. *eoPortal Directory: WorldView-2*. [viitattu 10.10.2015]. Saatavilla: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/worldview-2>
- 45 European Space Agency. *eoPortal Directory: GeoEye-1*. [viitattu 10.10.2015]. Saatavilla: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/g/geoeye-1>
- 46 Satellite Imaging Corporation. *WorldView-2 Satellite Sensor*. [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla: <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-2/>
- 47 Satellite Imaging Corporation. *GeoEye-1 Satellite Sensor*. [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla: <http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/geoeye-1/>
- 48 Davis, J. *NRO gives NASA two hand-me-down telescopes*. [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla: <http://www.planetary.org/blogs/guest-blogs/jason-davis/nasa-gets-two-hand-me-down.html>
- 49 European Space Agency. *eoPortal Directory: Ikonos-2*. [viitattu 10.10.2015]. Saatavilla: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/ikonos-2>
- 50 Bossler, J. et al. *Manual of Geospatial Science and Technology*. 2. painos. Boca Raton: CSC Press, 2010. ISBN 978-1-4200-8734-5.
- 51 Auelmann, R. *Image Quality Metrics*. [viitattu 9.10.2015]. Saatavilla: <http://www.techarchive.org/wp-content/themes/boilerplate/largerdocs/Image%20Quality%20Metrics.pdf>
- 52 Richards, J. & Xiuping, J. *Remote Sensing Digital Image Analysis*. 4. painos. Berlin: Springer-Verlag, 2006. ISBN 978-3-540-25128-6. Saatavilla: https://uqu.edu.sa/files2/tiny_mce/plugins/filemanager/files/4260086/8/RS%20Digital%20Image%20Analysis.pdf

- 53 Drigger, R. *Encyclopedia of Optical Engineering: Pho-Z, Vol 3*. 1.painos. New York: Marcel Dekker, 2003. ISBN 0-8247-4252-4.
- 54 BlackBridge. Resources & Downloads. [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla: <http://blackbridge.com/rapideye/about/resources.htm>
- 55 LAND INFO Worldwide Mapping. Guide to Buying Optical Satellite Imagery. [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla: <http://www.landinfo.com/buying-optical-satellite-imagery-2.html>
- 56 Ilmatieteen Laitos. Nykyinen ilmasto - 30 vuoden keskiarvot. [viitattu 10.10.2015]. Saatavilla: <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/suomen-muuttuva-ilmasto/-/artikkeli/1c8d317b-5e65-4146-acda-f7171a0304e1/nykyinen-ilmasto-30-vuoden-keskiarvot.html>
- 57 Helsingin kaupunginkirjasto. Mistä löytyy tietoa millä tavoin aurinkotunnit laske-
taan? [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla: <http://www.kysy.fi/kysymys/mista-loytyy-tietoa-milla-tavoin-aurinkotunnit-lasketaan>
- 58 Karjalainen, M & Karila, K. *Modernien tutkasatelliittikuvien käytöstä kartoitussovel-
luksissa*. The Photogrammetric Journal of Finland, 2001. Vol. 22, no. 3. Saatavilla: http://foto.hut.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Karjalainen_Karila.pdf
- 59 Visa, A. et al. Korkean resoluution ja suuren kuva-alueen SAR. Maanpuolustuksen
tieteellinen neuvottelukunta, 2015/2500M-0031. ISBN 978-951-25-2753-3.
- 60 Chan, Y & Koo, V. An Introduction to Synthetic Aperture Radar (SAR). Progress in
Electromagnetics Research B, 2008. Vol 2, 27-60.. Saatavilla: <http://www.jpier.org/PIERB/pierb02/03.07110101.pdf>
- 61 Richards, A. et al. *Principles of Modern Radar Volume 1 - Basic Principles*. 1. pai-
nos. Raleigh, SciTech Publishing Inc, 2010. ISBN: 978-1-891121-52-4.
- 62 Melvin, W. & Scheer, J. *Principles of Modern Radar Volume 2 - Advanced
Techniques*. 1. painos. Raleigh, SciTech Publishing Inc, 2013.
ISBN 978-1-891121-53-1.
- 63 Zhou, Xiaobing et al. *Applications of SAR Interferometry in Earth and Environmental
Science Research*. Sensors. 2009, Vol 9(3).
- 64 Melvin, W. & Scheer, J. *Principles of Modern Radar Volume 3 - Radar Applications*.
1. painos. Raleigh, SciTech Publishing Inc, 2014. ISBN: 978-1-89112-154-8.
- 65 Griffiths, Hugh. *Stimson's Introduction to Airborne Radar (Electromagnetics and Ra-
dar)*. 3. painos. Yhdysvallat, Sheridan Books Inc, 2014. ISBN 978-1-61353-022-1.
- 66 Edelstein, W. Et al. *Concepts and Technologies for Synthetic Aperture Radar
from MEO and Geosynchronous orbits*. Proceedings of SPIE, 2004. Vol. 5649,
Enabling Sensor and Platform Technologies for Spaceborne Remote Sensing.
Saatavilla: https://radar.jpl.nasa.gov/files/ref%20_SPIE%20paper.pdf
- 67 Japan Aerospace Exploration Agency. *Advanced Land Observing Satellite-2* [viitattu
20.3.2016]. Saatavilla: http://global.jaxa.jp/projects/sat/alos2/pdf/daichi2_e.pdf
- 68 radartutorial.eu. *Synthetic Aperture Radar Modes*. [viitattu 16.3.2016]. Saatavilla: <http://www.radartutorial.eu/20.airborne/ab08.en.html>

- 69 Saarelainen, Tapio. *Tilannetietoisuuden parantaminen sensorielementtiammuksella*. Tiede ja ase. 2012. Vol 70. [viitattu 25.3.2016].
Saatavilla: <http://ojs.tsv.fi/index.php/ta/article/view/8076>
- 70 Mather, Paul. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images: An Introduction*. 4. painos. Chichester, John Wiley & Sons, 2011. ISBN 978-0-470-74239.
- 71 European Space Agency. *Sentinel-2 User guide: definitions*. [viitattu 15.3.2016].
Saatavilla: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/definitions>
- 72 Kondar, Maj et al. *Detection and Identification of Objects in Applications of GIS*. Military University of Warsaw. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla:
http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2008/sbornik/Lists/Papers/104.pdf
- 73 Jensen, J. et al. *Change Detection Technology Evaluation*. [viitattu 15.10.2015].
Saatavilla: http://www2.census.gov/geo/pdfs/gssi/change_detection_2012.pdf
- 74 Baatplasse.no. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla:
<http://baatplassen.no/bildearkiv/23/23820/hauk.jpg>
- 75 Sajari, Petri. *Tilaisuus turvaa Helsingin telakan työt pitkään*. Helsingin Sanomat 22.4.2015. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://www.hs.fi/talous/a1398050578797>
- 76 Минобороны России. ВКС завершили операции по уводу разгонного блока «Бриз-М» с целевой орбиты космического аппарата «Космос-2513». [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla:
http://function.mil.ru/news_page/country/more.htm?id=12071684@egNews
- 77 Zak, Anatoly. *Kobalt-M reconnaissance satellite series*. [viitattu 15.3.2016].
Saatavilla: http://www.russianspaceweb.com/kobalt_m.html
- 78 Spaceflight101.com. *Kobalt-M Satellite Overview*. [viitattu 15.3.2016].
Saatavilla: <http://spaceflight101.com/spacecraft/kobalt-m/>
- 79 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Satellite Catalog (luettelo kaikista Maan kiertoradoilla olevista kappaleista)*. [viitattu 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/#/catalog>
- 80 Spaceflight101.com. *Persona Satellite Overview*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla:
<http://spaceflight101.com/spacecraft/persona-satellite-overview/>
- 81 Krebs, Gunter. *Persona*. [viitattu 15.3.3.2016]. Saatavilla:
http://space.skyrocket.de/doc_sdat/persona.htm
- 82 Zak, Anatoly. *Persona*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla:
<http://www.russianspaceweb.com/persona.html>
- 83 National Aeronautics and Space Administration. *NASA Space Science Data Coordinated Archive: Cosmos 2486*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla:
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2013-028A>
- 84 Russian Federal Space Agency. *Remote Sensing System (RSS)*. [viitattu 20.3.2016].
Saatavilla: <http://en.federspace.ru/356/>
- 85 коммсант. *В космосе появилась "Персона"*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla:
<http://www.kommersant.ru/doc/916726>

- 86 Bellingcat Investigation Team. *Comparison of Digital Globe 17 July Satellite Imagery with Russian Ministry of Defense 17 July Satellite Imagery*. [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: https://www.bellingcat.com/wp-content/uploads/2015/06/17_july_satellite_imagery_comparison1.pdf
- 87 КОММЕСАНТ. *В «Персону» вернули в строй*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://www.kommersant.ru/doc/2538881>
- 88 Российской газете. *Шпион на связь не вышел*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://rg.ru/2009/02/11/sputnik.html>
- 89 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Persona-1 TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta*. [viitattu. 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 90 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Persona-2 TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta*. [viitattu. 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 91 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Persona-3 TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta*. [viitattu. 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 92 Russian News Agency. *Russia involves 10 reconnaissance satellites in Syria operation*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://tass.ru/en/science/837273>
- 93 Spaceflight101.com. *Russia reinforces Satellite Support of Military Activities in Syria*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://spaceflight101.com/russia-reinforces-satellite-support-of-military-activities-in-syria/>
- 94 Zak, Anatoly. *Kondor*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://www.russianspaceweb.com/kondor.html>
- 95 Spaceflight101.com. *Kondor Spacecraft Overview*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://spaceflight101.com/spacecraft/kondor/>
- 96 National Aeronautics and Space Administration. *NASA Space Science Data Coordinated Archive: Kondor*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2013-032A>
- 97 РИА Новости. *Роскосмос: радарный спутник "Кондор" проходит процедуру отладки*. [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: <http://ria.ru/science/20131001/966993377.html>
- 98 NPO MASHINOSTROYENIA. *Condor-E Small Spacecraft with synthetic aperture radar*. [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: http://www.npomash.ru/activities/images/radio_en.pdf
- 99 NPO MASHINOSTROYENIA. *Condor-E Small Spacecraft with an electro-optical sensor*. [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: http://www.npomash.ru/activities/images/optic_en.pdf
- 100 National Aeronautics and Space Administration. *NASA Space Science Data Coordinated Archive: Kondor-E*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2014-084A>
- 101 ОАО "Концерн "Вега". *Радиолокатор синтезированной апертуры обзора земной поверхности для малых космических аппаратов*. [viitattu 20.3.2016] Saatavilla: <http://www.vega.su/production/detail.php?ID=17>

- 102 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Kondor TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta*. [viitattu 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 103 Zak, Anatoly. *Bars-M: Russia's first digital cartographer*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://www.russianspaceweb.com/bars-m.html>
- 104 National Aeronautics and Space Administration. *NASA Space Science Data Coordinated Archive: Cosmos 2503*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2015-009A>
- 105 Spaceflight101.com. *Bars-M Satellite Overview*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://spaceflight101.com/spacecraft/bars-m/>
- 106 Spaceflight101.com. *Military Mapping Satellite lifts off atop Russia's Soyuz Rocket*. [viitattu 1.4.2016]. Saatavilla: <http://spaceflight101.com/military-mapping-satellite-lifts-off-atop-russias-soyuz-rocket/>
- 107 National Aeronautics and Space Administration. *NASA Space Science Data Coordinated Archive: Cosmos 2515*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=2016-020a>
- 108 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Bars-M1 TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta*. [viitattu 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 109 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Bars-M2 TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta*. [viitattu 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 110 Lavers, C. *The Origins of High Resolution Civilian Satellite Imaging - Part 1: An Overview*. [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla: <http://www.directionsmag.com/entry/the-origins-of-high-resolution-civilian-satellite-imaging-part-1-an-ov/303374>
- 111 Florini, A. & Dehqanzada, Y. *Commercial Satellite Imagery Comes of Age*. Issues in Science and Technology, 1999. Vol. 16, no. 1. Saatavilla: <http://issues.org/16-1/florini/>
- 112 SPACENEWS. *German Imagery Policy Sets No Hard Limits on Resolution*. [viitattu 15.10.2015]. Saatavilla: <http://spacenews.com/37666commercial-earth-observation-german-imagery-policy-sets-no-hard-limits-on/>
- 113 Markedwired. *U.S. Department of Commerce Relaxes Resolution Restrictions DigitalGlobe Extends Lead in Image Quality*. [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla: <http://www.marketedwired.com/press-release/us-department-commerce-relaxes-resolution-restrictions-digitalglobe-extends-lead-image-nyse-dgi-1919482.htm>
- 114 Defense One. *America Needs to Lead Globally on GEOINT*. [viitattu 15.10.2015]. Saatavilla: <http://www.defenseone.com/technology/2013/11/america-needs-lead-globally-geoint/74003/>
- 115 Joint Concept Note 3/12. *Future Air and Space Operating Concept*. Shrivenham: Ministry of Defence, 2012.
- 116 DigitalGlobe. Direct Access Program. [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla: <https://dg-cms-uploads-production.s3.amazonaws.com/uploads/document/file/9/DirectAccess-DS.pdf>

- 117 Satellite Imaging Corporation. *Satellite Image Processing Services*. [viitattu 15.1.2016]. Saatavilla: <http://www.satimagingcorp.com/services/>
- 118 Samara Space Center. *Resurs-DK1 Satellite*. [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: http://en.samspace.ru/products/earth_remote_sensing_satellites/ka_resurs_dk_1/
- 119 Zak, Anatoly. *Resurs-DK*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: http://www.russianspaceweb.com/resurs_dk.html
- 120 Anshakov, G. *The Russian project of "resurs-DK 1" space complex development. Status, prospects, new opportunities for the consumers of space snapshots. Acta Astronautica, 2000. Vol. 47, issues 2-9*. http://ac.els-cdn.com/S009457650000076X/1-s2.0-S009457650000076X-main.pdf?_tid=10d9a492-ec3d-11e5-a8c2-00000aacb360&acdnat=1458218452_fa2993247b249df4b6633eeb764c4a5f
- 121 ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ ЦЕНТР УПРАВЛЕНИЯ ПОЛЕТАМИ. *СОБЫТИЯ В ОКОЛОЗЕМНОМ КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ февраль 2016 года*. [viitattu 1.4.2016]. Saatavilla: http://www.aspos.mcc.rsa.ru/pls/apex/aspos_okp_portal.wvp_publications_doc.download?p_publication_id=690
- 122 European Space Agency. *eoPortal Directory: Resurs-DK*. [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/resurs-dk1>
- 123 НТЦ «БЕЛМИКРОСИСТЕМЫ». *Состояние и перспективы развития высоконадежной элементной базы производства ОАО «Интеграл»*. [viitattu 20.3.2016] Saatavilla: http://xn--k1ahfc2d.xn--p1ai/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=386&Itemid=34
- 124 Л.А. Амелин et al. *РЕЗУЛЬТАТЫ НАЗЕМНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДИНАМИЧЕСКОГО МАКЕТА КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «КАНОПУС-В» № 1*. [viitattu 20.3.2016] Saatavilla: <http://jurnal.vniiem.ru/text/136/31-34.pdf>
- 125 АО Корпорация ВНИИЭМ. *КОСМИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС КАНОПУС-В*. [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: http://www.vniiem.ru/ru/index.php?option=com_content&view=article&id=622:-1-r-1-3-4-5-6&catid=85:-1-r&Itemid=62
- 126 Федеральное космическое агентство. *Снимки с КА "Канопус-В" №1*. [viitattu 20.3.2016] Saatavilla: <http://www.federalspace.ru/374/>
- 127 Roscosmos. *Roscosmos Participation in the International Charter on Space and Major Disaster*. [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: <http://www.apec-epwg.org/public/uploadfile/act/Roscosmos.pdf>
- 128 Zak, Anatoly. *Resurs-P2 bolsters Russia's remote-sensing constellation*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: http://www.russianspaceweb.com/resurs_p2.html
- 129 European Space Agency. *eoPortal Directory: Resurs-P (Resurs-Prospective) Remote Sensing Mission Constellation*. [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/r/resurs-p>
- 130 Федерального космического агентства. *РОСКОСМОС. ПОДГОТОВКА КА «РЕСУРС-П» НА БАЙКОНУРЕ*. [viitattu 20.3.2016] Saatavilla: <http://www.roscosmos.ru/21985/>

- 131 РОСКОСМОС. ЦУП. «РЕСУРС-П» № 3 УСПЕШНО ВЫВЕДЕН НА РАБОЧУЮ ОРБИТУ. [viitattu 1.4.2016]. Saatavilla: <http://www.roscosmos.ru/22042/>
- 132 РОСКОСМОС. ПРОДОЛЖАЕТСЯ ТЕСТИРОВАНИЕ КА РЕСУРС-П №3 [viitattu 1.4.2016]. Saatavilla: <http://www.roscosmos.ru/22075/>
- 133 Peshkun, A. *Resurs-P Capabilities, standard products. From Imagery to Map: digital photogrammetric technologies - 14th International Scientific and Technical Conference: conference proceedings.* [viitattu 20.3.2016] Saatavilla: http://conf.racurs.ru/images/abstracts/Abstract_ENG.pdf
- 134 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Resurs-DK1 TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta.* [viitattu. 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 135 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Kanopus-V-1 TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta.* [viitattu. 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 136 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Resurs-P1 TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta.* [viitattu. 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 137 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Resurs-P2 TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta.* [viitattu. 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 138 Joint Functional Component Command for Space (JFCC SPACE). *Space-track.org: Resurs-P3 TLE-parametrit satelliitin koko elinkaaren ajalta.* [viitattu 1.4.2016]. Saatavilla: <https://www.space-track.org/>
- 139 Samara Space Rocket Centre. *Resurs-P No2 Satellite.* [viitattu 1.4.2016] Saatavilla: http://en.samspace.ru/products/earth_remote_sensing_satellites/ka_resurs_p2/
- 140 Zak, Anatoly. *Kanopus-V.* [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://www.russianspaceweb.com/kanopus.html>
- 141 Zak, Anatoly. *Kanopus-ST falls back to Earth.* [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla: <http://www.russianspaceweb.com/kanopus-st.html>
- 142 The Moscow Times. *Russia Delays New Space Program Plan Until March.* [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: <http://www.themoscowtimes.com/business/article/russia-delays-new-space-program-plan-until-march/556386.html>
- 143 Reuters. *Russian space agency scales back plans as crisis shrinks budget.* [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: <http://www.reuters.com/article/us-russia-space-idUSKCN0UY271>
- 144 TASS Russian News Agency. *Russia to give up Moon, Mars missions without support from Europe.* [viitattu 20.3.2016]. Saatavilla: <http://tass.ru/en/science/849578>
- 142 Roscomos. *Russian EO Missions - conference presentation 5-6 November 2015.* [viitattu 1.3.2016]. Saatavilla: https://www.ceos.org/document_management/Meetings/Plenary/29/Presentations/30k_Emelyanov_v3.pptx

- 143 Roscosmos. *Roscosmos Participation in the International Charter on Space and Major Disasters*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla:
<http://www.apec-epwg.org/public/uploadfile/act/Roscosmos.pdf>
- 144 Zak, Anatoly. *Obzor-R*. [viitattu 15.3.2016]. Saatavilla:
<http://www.russianspaceweb.com/obzor-r.html>
- 145 Hallikainen, M et al. Tiivistelmäraportti: Nanosatelliittien kehitys maanpuolustuksen näkökulmasta. Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta, 2012/MAT822.
- 146 Edner, M. *Smaller Satellites Operations Near Geostationary Orbit*. 1. painos. New York, Nova Science Publisher, 2009. ISBN: 978-1-61324-121-9.
- 147 Warwick, G. *The Future Of Cubesats: A Vision of Scotland*. Aviation Week & Space Technology. [viitattu 13.10.2015]. Saatavilla:
<http://aviationweek.com/technology/future-cubesats-vision-scotland>
- 148 National Aeronautics and Space Administration. *Definition of Two-line Element Set Coordinate System*. [viitattu 15.9.2015]. Saatavilla:
http://spaceflight.nasa.gov/realdata/sightings/SSapplications/Post/JavaSSOP/SSOP_Help/tle_def.html

LIITTEET

LIITE 1	Auringon korkeuskulma Helsingin leveyspiirillä vuonna 2016	4 sivua
LIITE 2	Pilvisyys Suomen rannikkoalueilla kuukausittain	2 sivua
LIITE 3	Esimerkkejä aluksen havaitsemisesta eri resoluutioilla	3 sivua
LIITE 4	Esimerkki alusten havaitsemisesta saaristossa muutostulkinta-työkalun avulla	5 sivua
LIITE 5	Two-line Element -koordinaatijärjestelmä ja tutkimuksessa käytetyt rataparamerit	2 sivua
LIITE 6	Venäjän laukaisemat sotilassatelliitit vuodesta 2001 alkaen	5 sivua
LIITE 7	Simuloinnin tarkemmat tulokset kuukausittain	28 sivua

AURINGON KORKEUSKULMA HELSINGIN LEVEYSPIIRILLÄ VUONNA 2016

Auringon korkeuskulman arvot koko vuoden 2016 ajalta saatiin käyttämällä internet-sivuston <http://susdesign.com/sunposition/index.php> -laskuria. Halutuksi leveyspiiriksi asetettiin 60° N ja ajanjaksoksi vuosi 2016. Datan tulostustiheydeksi valittiin yksi tunti eli tietoaaineistossa näkyi koko vuoden ajalta auringon korkeuskulma tunnin halutulla leveyspiirillä. Tietoaaineisto siirrettiin Excel-taulukkoon, jossa sen lajittelu ja laskeminen oli helpompaa.

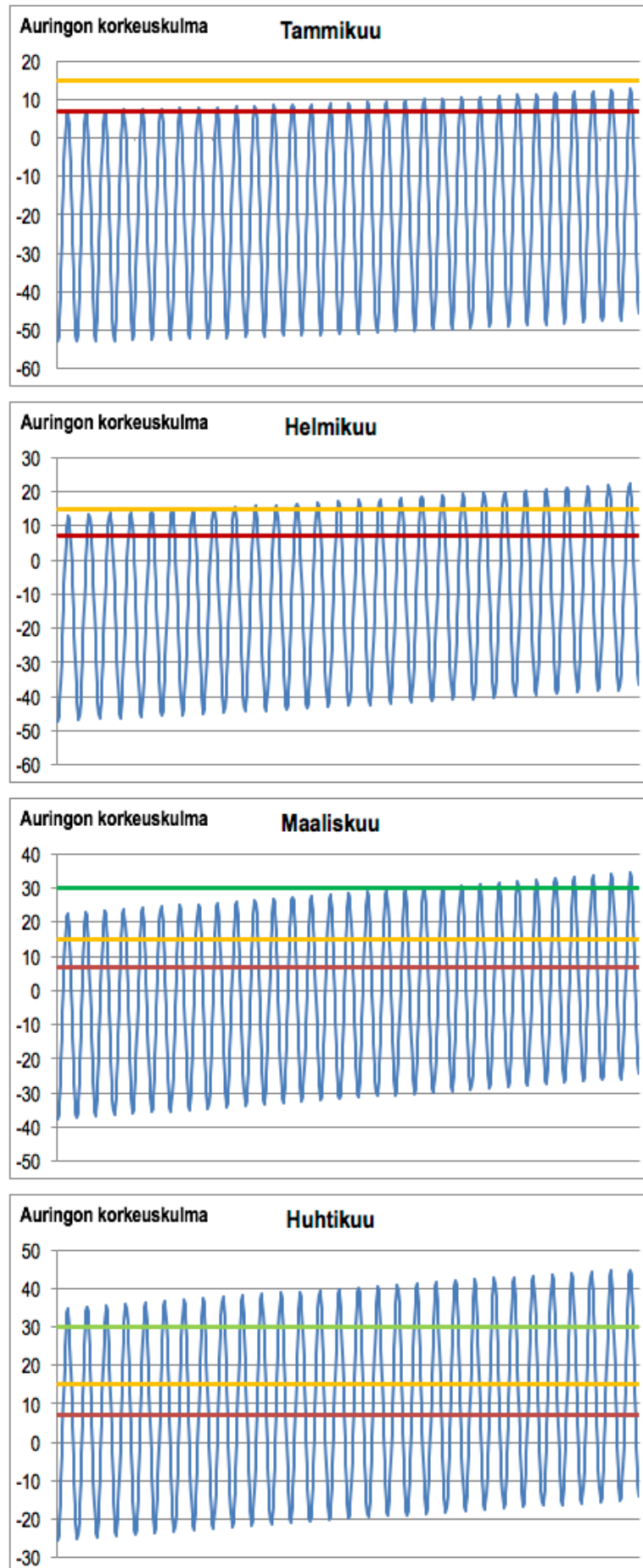
Taulukosta 8 näkyy vuorokautinen ja kuukausittainen keskiarvo ajasta tunteina, jolloin auringon korkeuskulma oli alle 7°, 7–15°, 15–30° ja yli 30° sekä kaikki tunnit yhteensä, jolloin korkeuskulma oli yli 7°.

Taulukko 8. Auringon eri korkeuskulmien tuntimääriä kuukausittain

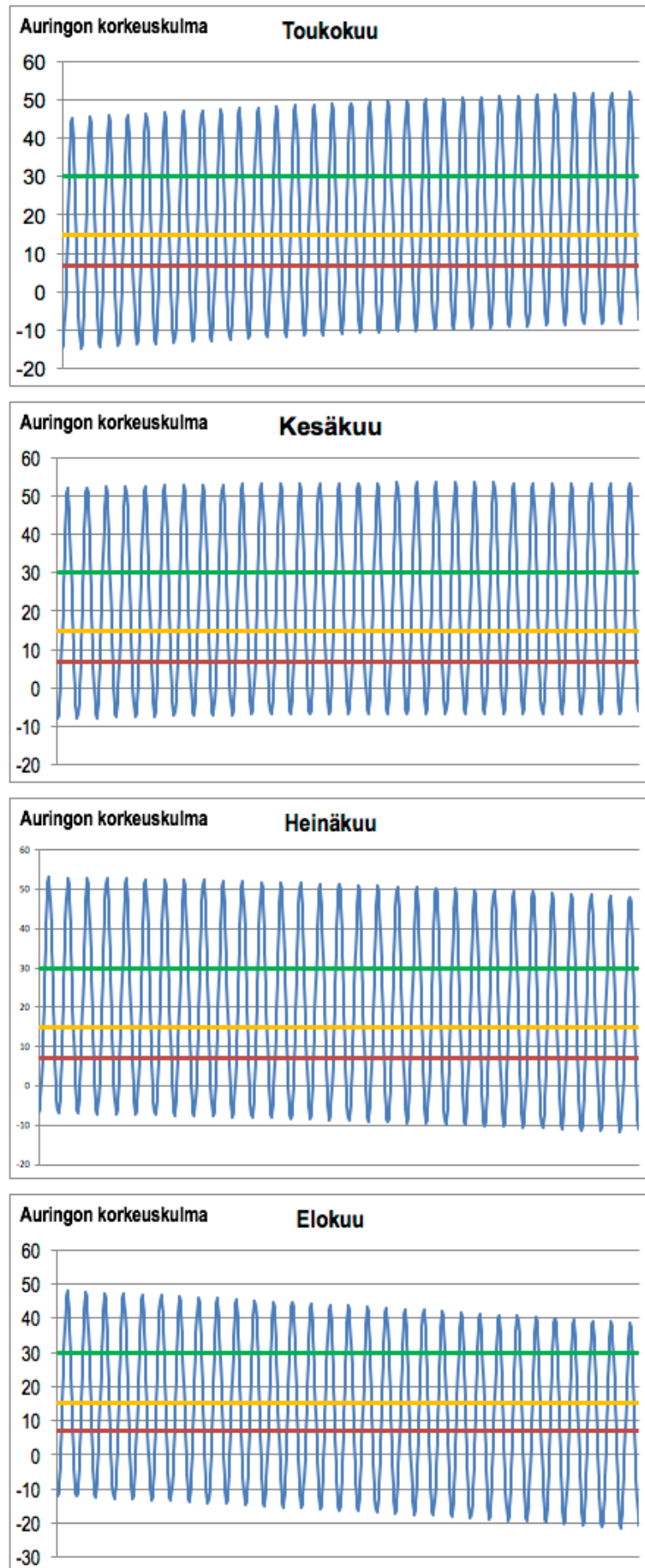
	Tuntia vuorokaudessa				
	<7°	7-15°	15-30°	>30°	yht. >7
Tammi	20,8	3,0	0,0	0,0	3,0
Helmi	17,4	3,9	2,7	0,0	6,6
Maalis	14,2	2,5	7,4	0,0	9,8
Huhti	11,6	2,1	4,3	6,0	12,4
Touko	9,3	2,2	4,1	8,4	14,7
Kesä	9,0	2,0	4,0	9,0	15,0
Heinä	9,0	2,0	4,0	9,0	15,0
Elo	10,6	2,3	4,3	9,0	15,5
Syys	13,4	2,2	5,7	2,7	10,6
Loka	16,2	3,1	4,8	0,0	7,9
Marras	19,7	4,2	0,1	0,0	4,2
Joulu	23,5	0,5	0,0	0,0	0,5

	Tuntia kuukaudessa				
	<7°	7-15°	15-30°	>30°	yht. >7
Tammi	645	94	0	0	94
Helmi	488	109	75	0	184
Maalis	439	76	229	0	305
Huhti	349	63	128	180	371
Touko	289	68	126	261	455
Kesä	270	60	120	270	450
Heinä	279	62	124	279	465
Elo	329	70	133	279	482
Syys	403	66	171	80	317
Loka	501	95	149	0	244
Marras	592	125	2	0	127
Joulu	730	14	0	0	14

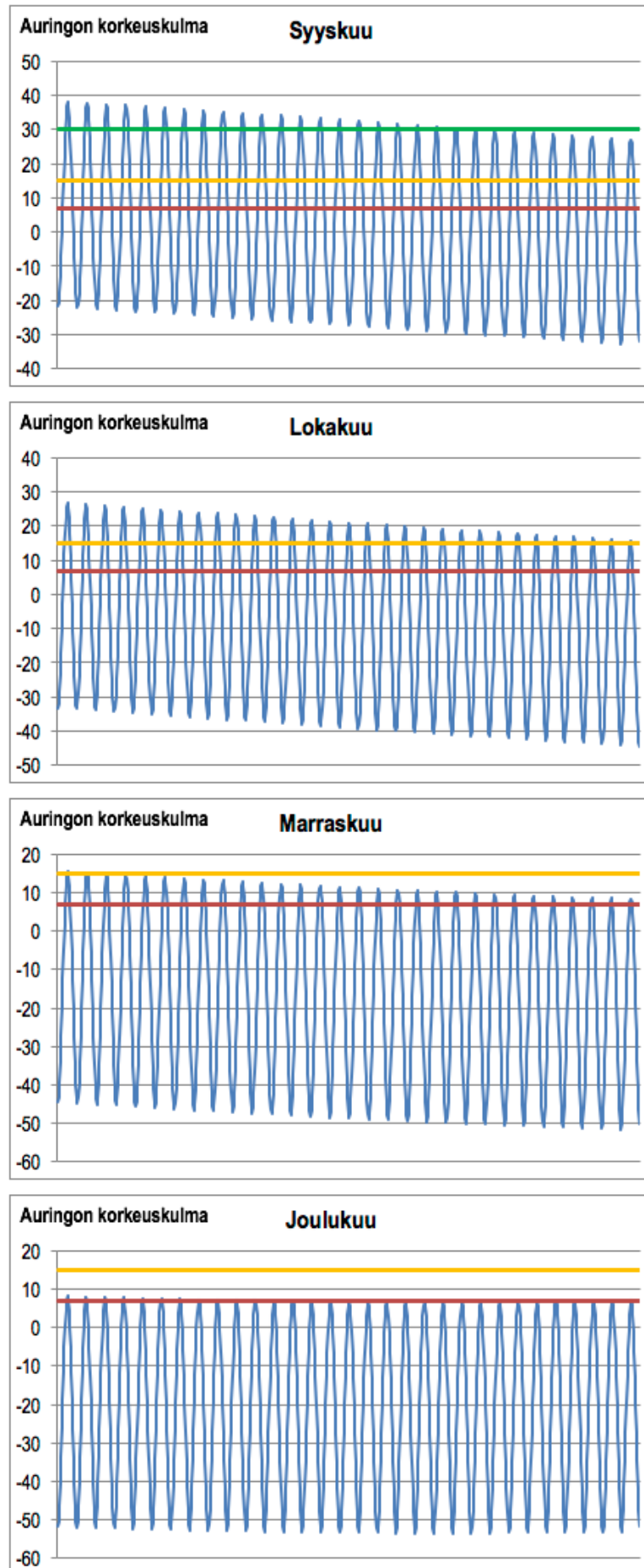
Seuraavien sivujen kuvissa (kuvat 48–50) on kuukausittainen kuvaaja auringon korkeuskulmasta päivämäärän ja vuorokauden ajan suhteen. Kuviin on merkitty punaisella, keltaisella ja vihreällä 7°, 15° ja 30° rajat.



Kuva 47. Auringon korkeuskulma tammikuusta huhtikuuhun



Kuva 48. Auringon korkeuskulma toukokuusta elokuuhun



Kuva 50. Auringon korkeuskulma syyskuusta joulukuuhun

PILVISYYS SUOMEN RANNIKKOALUEILLA KUUKAUSITTAIN

Tilastoja Suomen Ilmastosta 1981–2010 on Ilmatieteen laitoksen julkaisema raportti No. 2012:1. Se on ladattavissa Ilmatieteenlaitoksen internet-sivuilta.

Raportissa Utön leveyspiiriksi on määritetty 57,47° N ja havaintokuukausien lukumääräksi aurinkotuntien osalta 341 kuukautta eli noin 28 vuotta. Rankin leveyspiiriksi on määritetty 60,22° N ja havaintokuukausien lukumääräksi 344 kuukautta, eli myös noin 28 vuotta. Tilastoja on siis kuukausittain lähes 30 vuoden ajalta valituilta havaintopisteiltä.

Auringon korkeuskulman tietoaaineisto saatiin käyttämällä edellisessä liitteessä mainittua las-kuria. Tietoaaineisto kerättiin erikseen molempien paikkojen osalta käyttämällä näiden leveys-piirejä. Datan tiheydeksi valittiin yksi tunti ja laajuudeksi vuosi 2015. Auringon korkeuskul-ma vaihtelee hieman vuosittain, mutta tilastollisesti muutos on niin pieni, että yhden vuoden otantaa voidaan pitää riittävänä tarkkuutena. Aineisto siirrettiin Excel-taulukkoon ja siitä las-kettiin niiden tuntien määrä, jolloin auringon korkeuskulma on yli 0°, eli aurinko on horison-tin yläpuolella.

Taulukko 9. Utön ja Rankin mittauspisteiden auringonpaistetunnit

	UTÖ					RANKKI			
	Maksimi	Mitattu	Erotus	%		Maksimi	Mitattu	Erotus	%
Tammikuu	205	39	166	81,0 %	Tammikuu	198	36	162	81,8 %
Helmikuu	251	66	185	73,7 %	Helmikuu	248	74	174	70,2 %
Maaliskuu	364	138	226	62,1 %	Maaliskuu	364	134	230	63,2 %
Huhtikuu	428	211	217	50,7 %	Huhtikuu	429	200	229	53,4 %
Toukokuu	519	309	210	40,5 %	Toukokuu	524	293	231	44,1 %
Kesäkuu	565	308	257	45,5 %	Kesäkuu	570	285	285	50,0 %
Heinäkuu	542	321	221	40,8 %	Heinäkuu	550	317	233	42,4 %
Elokuu	477	259	218	45,7 %	Elokuu	481	243	238	49,5 %
Syyskuu	504	179	325	64,5 %	Syyskuu	506	156	350	69,2 %
Lokakuu	307	95	212	69,1 %	Lokakuu	306	87	219	71,6 %
Marraskuu	222	39	183	82,4 %	Marraskuu	220	33	187	85,0 %
Joulukuu	163	26	137	84,0 %	Joulukuu	157	22	135	86,0 %
	4417	1990	2557	57,9 %		4421	1880	2673	60,5 %

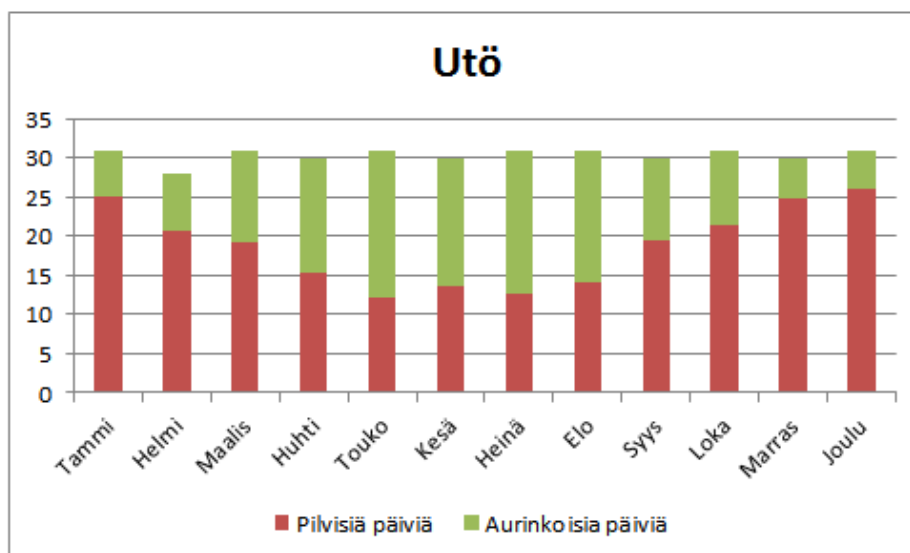
Taulukossa 9 aurinkotuntien maksimiarvot on laskettu edellisessä kappaleessa mainitulla ta-valla. Mitatut arvot ovat Ilmatieteen laitoksen 30 vuoden mittausten kuukausittaiset keskiar-vot. Näiden perusteella on laskettu prosentuaalisesti pilvesten ajan osuus määrä kuukauden valoisasta ajasta. Esimerkiksi Utössä on tammikuussa keskimäärin valoisasta ajasta pilvistä noin 81 %. Koska Ilmatieteen laitos tilastoi vain aurinkotuntien määrää, ei pilvisyyttä öisin tai pimeään aikaan ole mitattu.

Laskettujen prosenttien perusteella voidaan määrittää pilvisten sekä auringoisten päivien lukumäärä kuukausittain (kuvat 51 ja 52). Taulukosta 10 havaitaan, ettei pilvisyys vaihtelevin merkittävästi Utön ja Rankin välillä. Tilastollisesti itäisellä Suomenlahdella on hieman Saaristomerta pilvisempää.

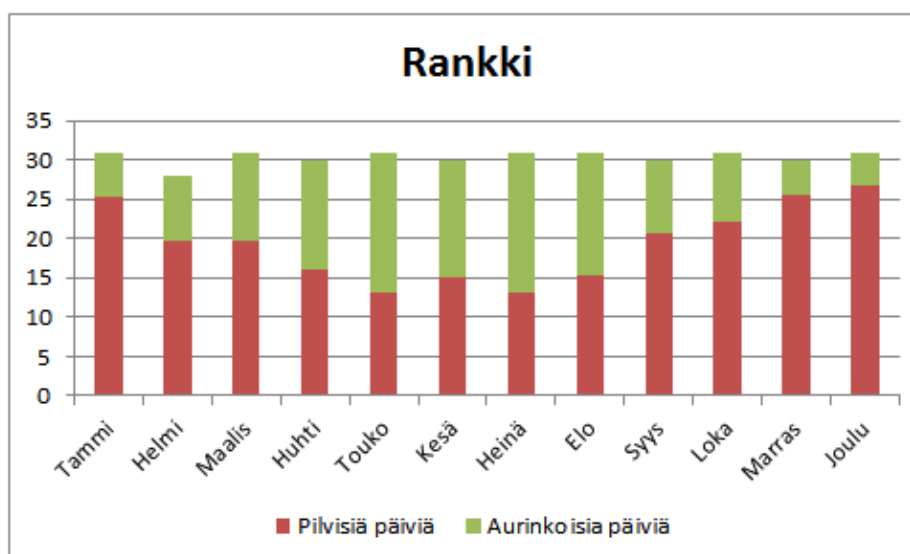
Taulukko 10. Utön ja Rankin mittauspisteiden pilvisyyden todennäköisyys

Utö	Tammi	Helmi	Maalis	Huhti	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu	ka
Pilvisyys (%)	81,0	73,7	62,1	50,7	40,5	45,5	40,8	45,7	64,5	69,1	82,4	84,0	57,9
Pilvisiä päiviä	25,1	20,6	19,2	15,2	12,1	13,6	12,6	14,2	19,3	21,4	24,7	26,1	206
Aurinkoisia päiviä	5,9	7,4	11,8	14,8	18,9	16,4	18,4	16,8	10,7	9,6	5,3	4,9	159

Rankki	Tammi	Helmi	Maalis	Huhti	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu	ka
Pilvisyys (%)	69,2	70,2	63,2	53,4	44,1	50,0	42,4	49,5	69,2	71,6	85,0	86,0	60,5
Pilvisiä päiviä	25,4	19,6	19,6	16,0	13,2	15,0	13,1	15,3	20,8	22,2	25,5	26,7	215
Aurinkoisia päiviä	5,6	8,4	11,4	14,0	17,8	15,0	17,9	15,7	9,2	8,8	4,5	4,3	150



Kuva 51. Pilvisten ja aurinkoisten päivien määrä keskimäärin Utössä

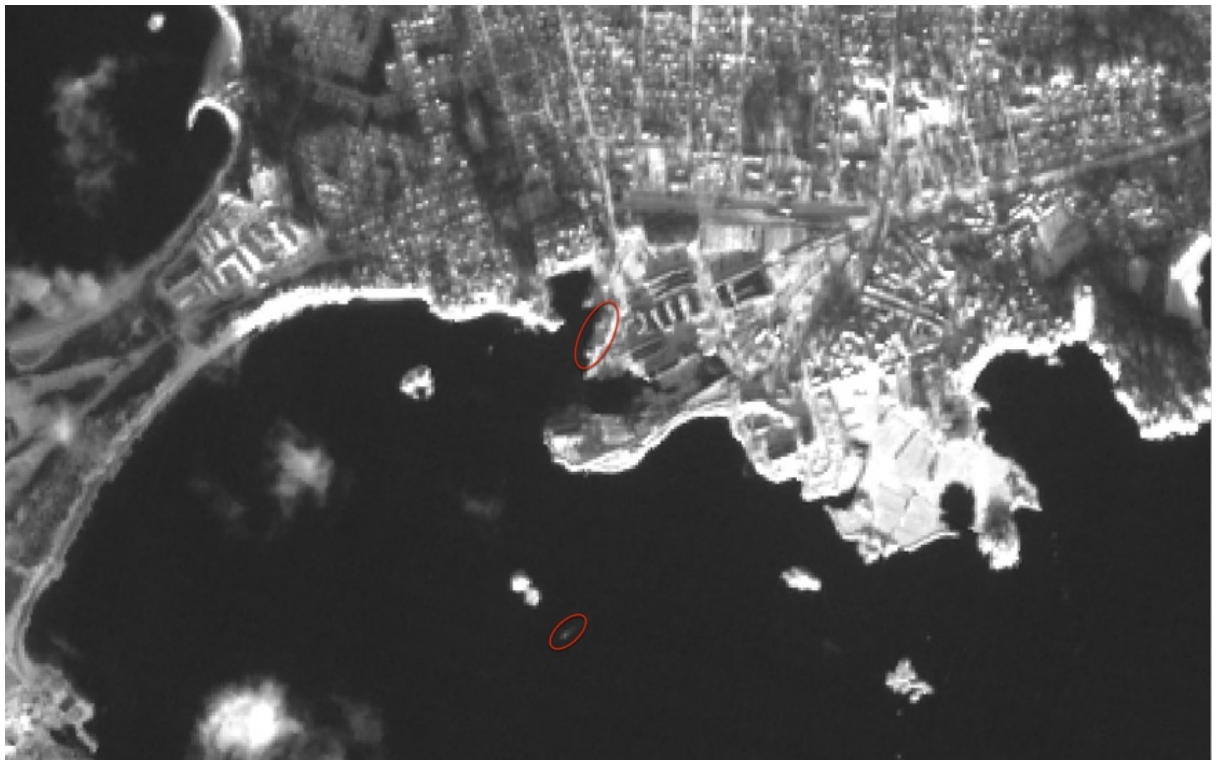


Kuva 52. Pilvisten ja aurinkoisten päivien määrä keskimäärin Rankissa

ESIMERKKEJÄ ALUKSEN HAVAITSEMISESTA ERI RESOLUUTIOILLA

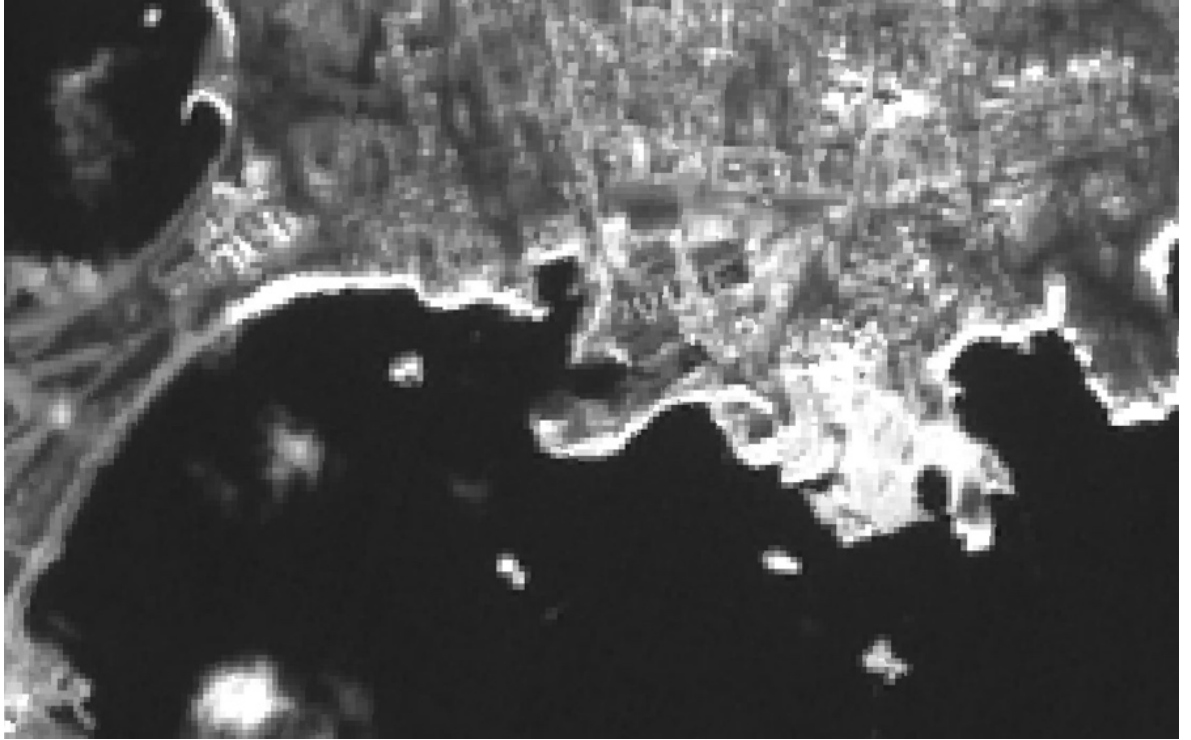
Liitteen kuvamateriaalina on käytetty Euroopan avaruusjärjestön ESA:n Sentinel-2-satelliitin kuvia. Satelliitin kaikki kuvat ovat julkisesti ladattavissa ESA:n internet-palvelusta. Satelliitti kuvaa multispektrisesti optista aluetta 12 eri kanavalla, joiden resoluutio on 10 ja 60 metrin välillä. Tässä esimerkissä on käytetty kanavia 4 (resoluutio 10 m), 5 (resoluutio 20 m) ja 1 (resoluutio 60 m). Varsinainen kuva on koko läntisen Suomenlahden alueelta, mutta tässä se on tarkennettu Hangon satamaan.

10 metrin erotuskyvyllä näkyy selkeästi yksi alus satamassa ja toinen pienempi alus merellä (kuva 53):



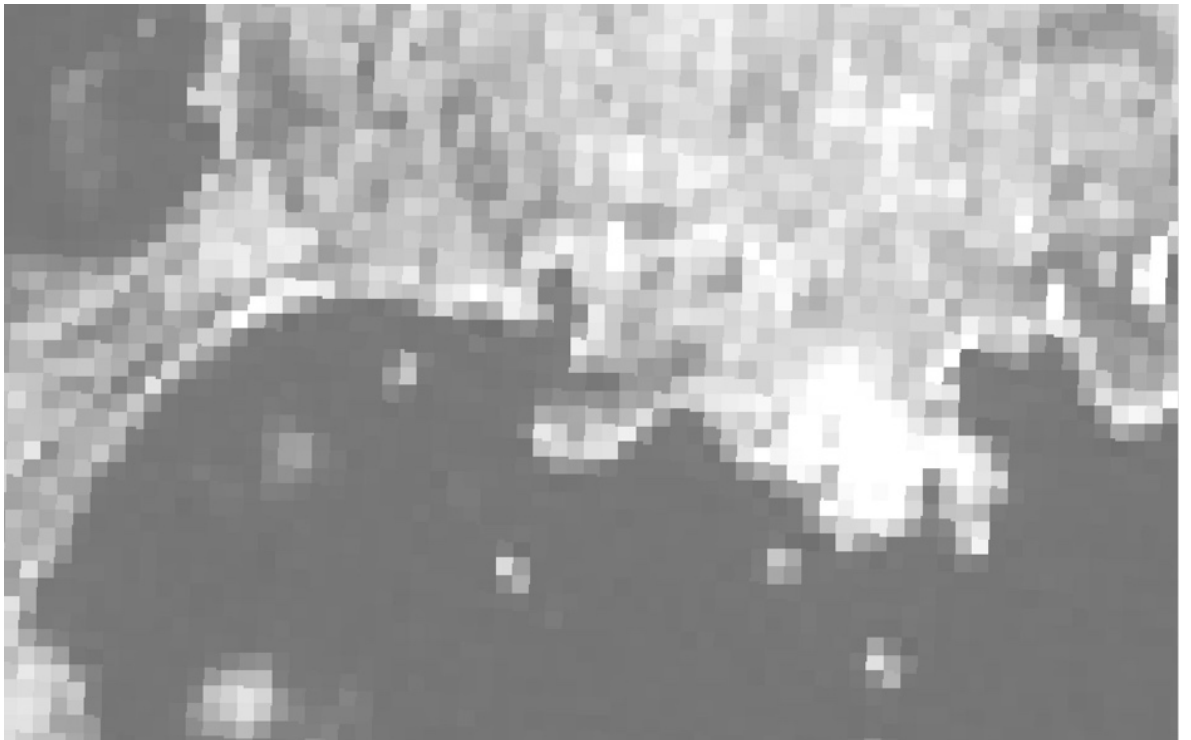
Kuva 53. Hangon satama 10 m resoluutiolla kuvattuna

20 metrin erotuskyvyllä molemmat alukset erottuvat vielä kuvasta, mutta tunnistaminen alukseksi on huomattavasti hankalampaa (kuva 54):



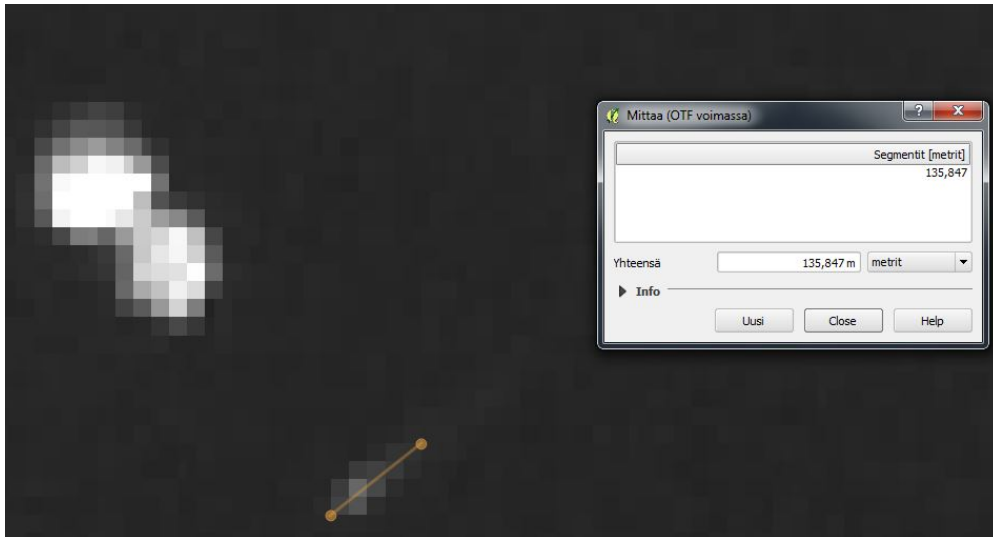
Kuva 54. Hangon satama 20 m resoluutiolla kuvattuna

60 metrin erotuskyvyllä satamassa olevaa alusta ei pysty enää erottamaan rannasta. Merellä olevan aluksen kohdalla voi nähdä vielä pienen eron ympäröivään mereen (kuva 55).



Kuva 55. Hangon satama 60 m resoluutiolla kuvattuna

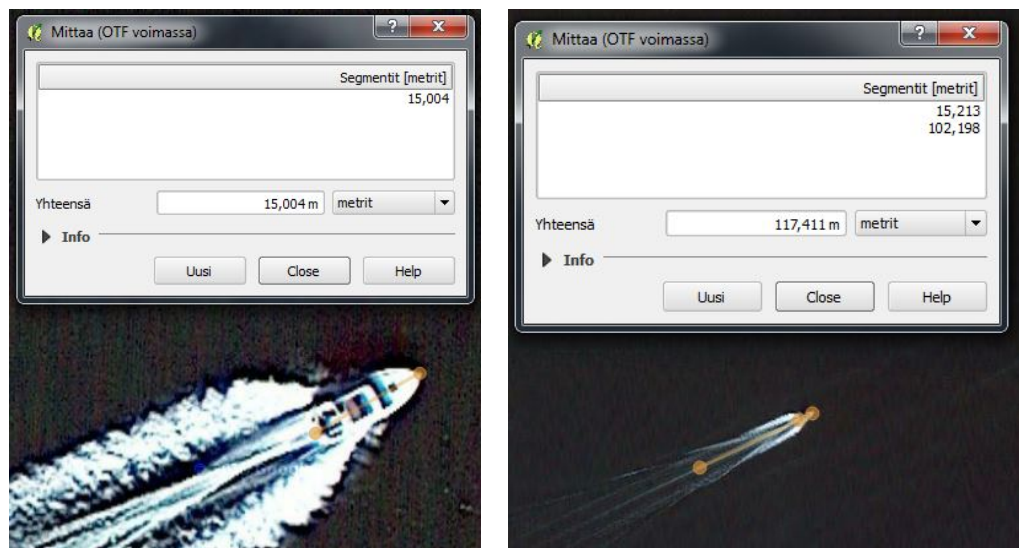
10 metrin erotuskyvyllä olevasta kuvasta mitattuna merellä oleva alus on noin 100–150 metriä pitkä. Tällä resoluutiolla ei pystytä kuitenkaan määrittelemään enää tarkasti sitä, että mihin alus loppuu ja mistä vanavesi alkaa (kuva 56):



Kuva 56. Suurennos kuvasta 53 ja etäisyyden mittaus QGIS-ohjelmistolla

Pienikin alus saattaa siis näkyä matalaresoluutioisessa kuvassa, mikäli sen kulkunopeudesta aiheutuu merkittävä vanavesi. Vanavedettömän nopeuden käyttö on yksi suojautumisen keinosta ja ainakin hankaloittaa aluksen löytämistä saaristosta.

Vanaveden vaikutus näkyy selkeästi seuraavassa Google Earthin (georeferoidussa) kuvassa. Aluksen pituus on vain noin 15 metriä, mutta vanavesi näkyy selkeästi vielä 100 metriä aluksen takana (kuva 57):

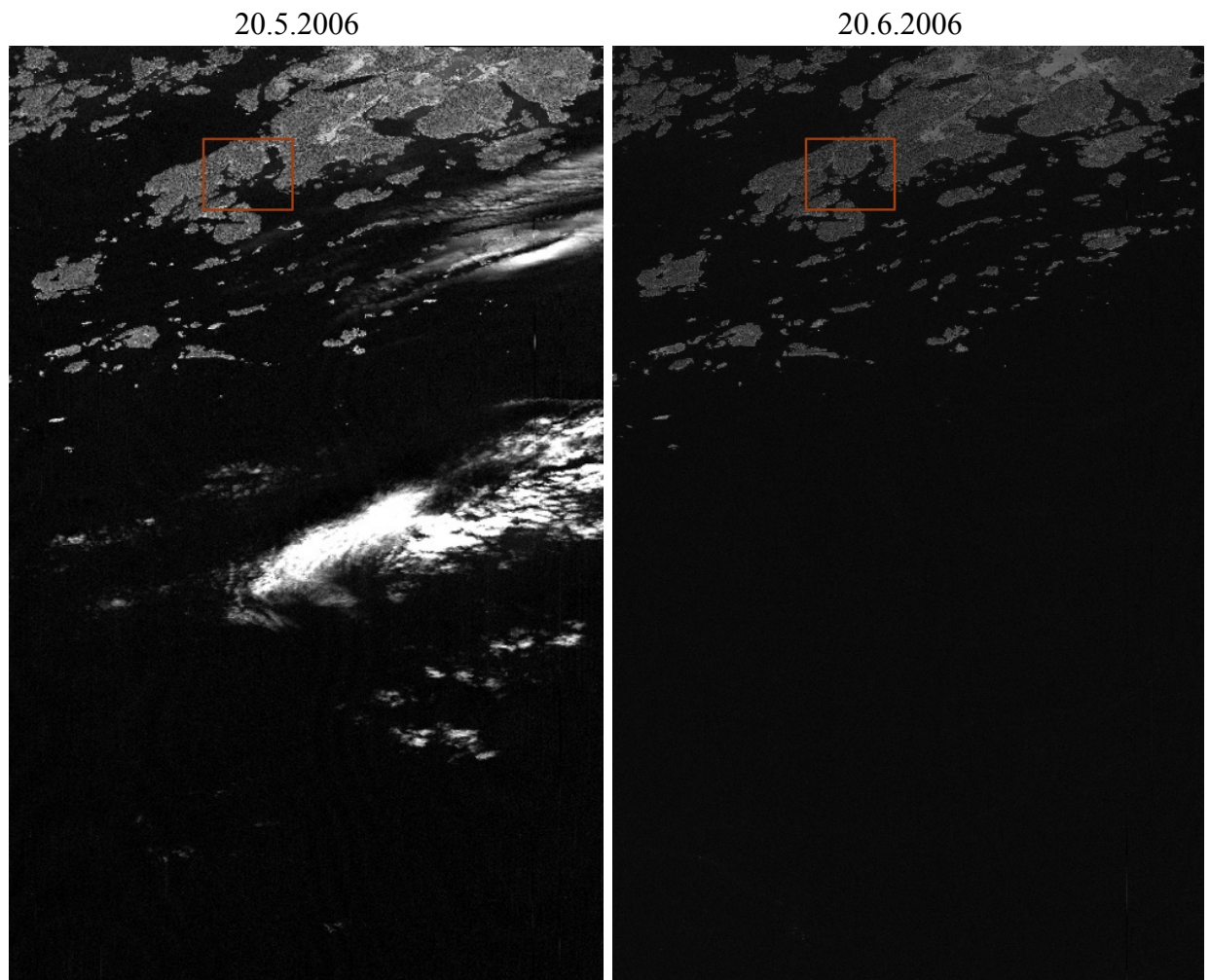


Kuva 57. QGIS-ohjelmiston mittaustyökalun käyttö Google Earth -kuvassa

ESIMERKKI ALUSTEN HAVAITSEMISESTA SAARISTOSSA MUUTOSTULKINTA-TYÖKALUN AVULLA

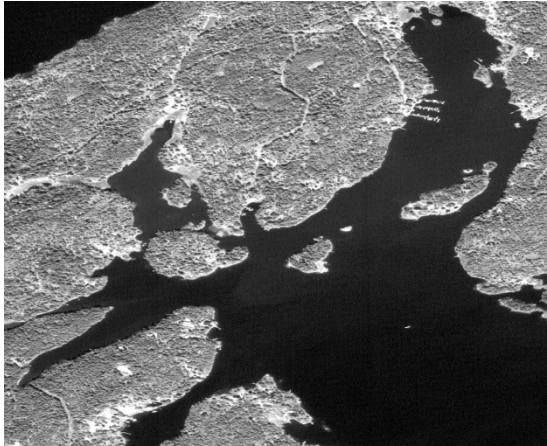
Esimerkissä käytetyt satelliittikuvat ovat saatavilla Yhdysvaltain geologian tutkimuskeskuk-
sen ylläpitämältä EarthExplorer-internet-sivustolta. Sivustolta löytyy Orbview-3-satelliitin
ottamia yhden metrin resoluutiolla olevia pankromaattisia kuvia. Etelä-Suomen rannikolta
löytyy muutama satelliittikuva samalta alueelta, joita on käytetty tässä esimerkissä.

Valittujen kuvien alue kartalla on Porkkalan niemi (kuva 58). Satelliittikuvat ovat kooltaan
8016×27648 pikseliä eli kilometreinä on noin 8×30 km (240 km²). Valitaan kuvista mittakaa-
vassa 1:1 tarkempi alue jatkokäsittelyyn (kuva 59)

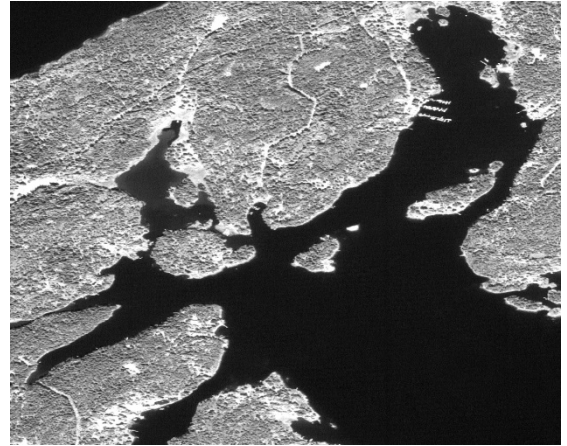


Kuva 58. Orbview 3 -satelliitin kuvat Porkkalan niemestä 20.5.2006 ja 20.6.2006

26.5.2006



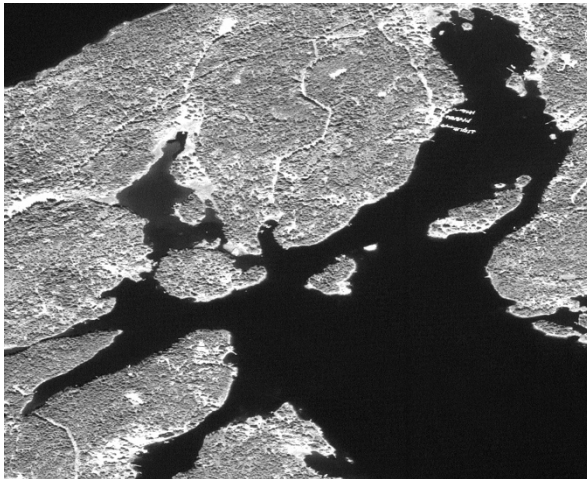
20.6.2006



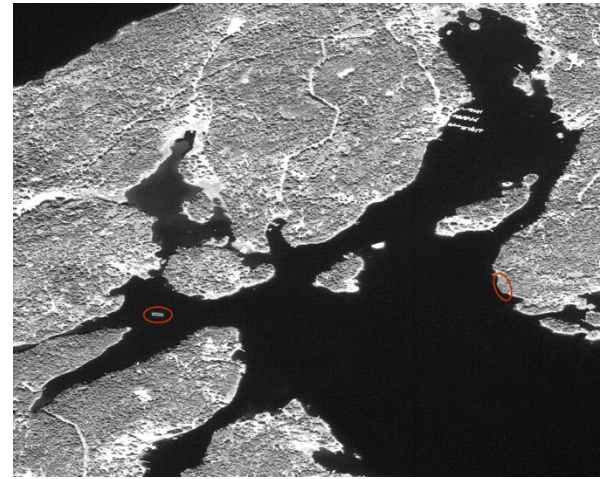
Kuva 59. Alueen valinta ja suurennos kuvasta 58

Jälkimmäiseen kuvaan lisättiin kuvankäsittelyohjelmalla kaksi 50 metriä pitkää kohdetta (ohjusvene), joista toinen on paikallaan merellä ja toinen maastoutettuna saaren rannassa (kuva 60).

Alkuperäinen

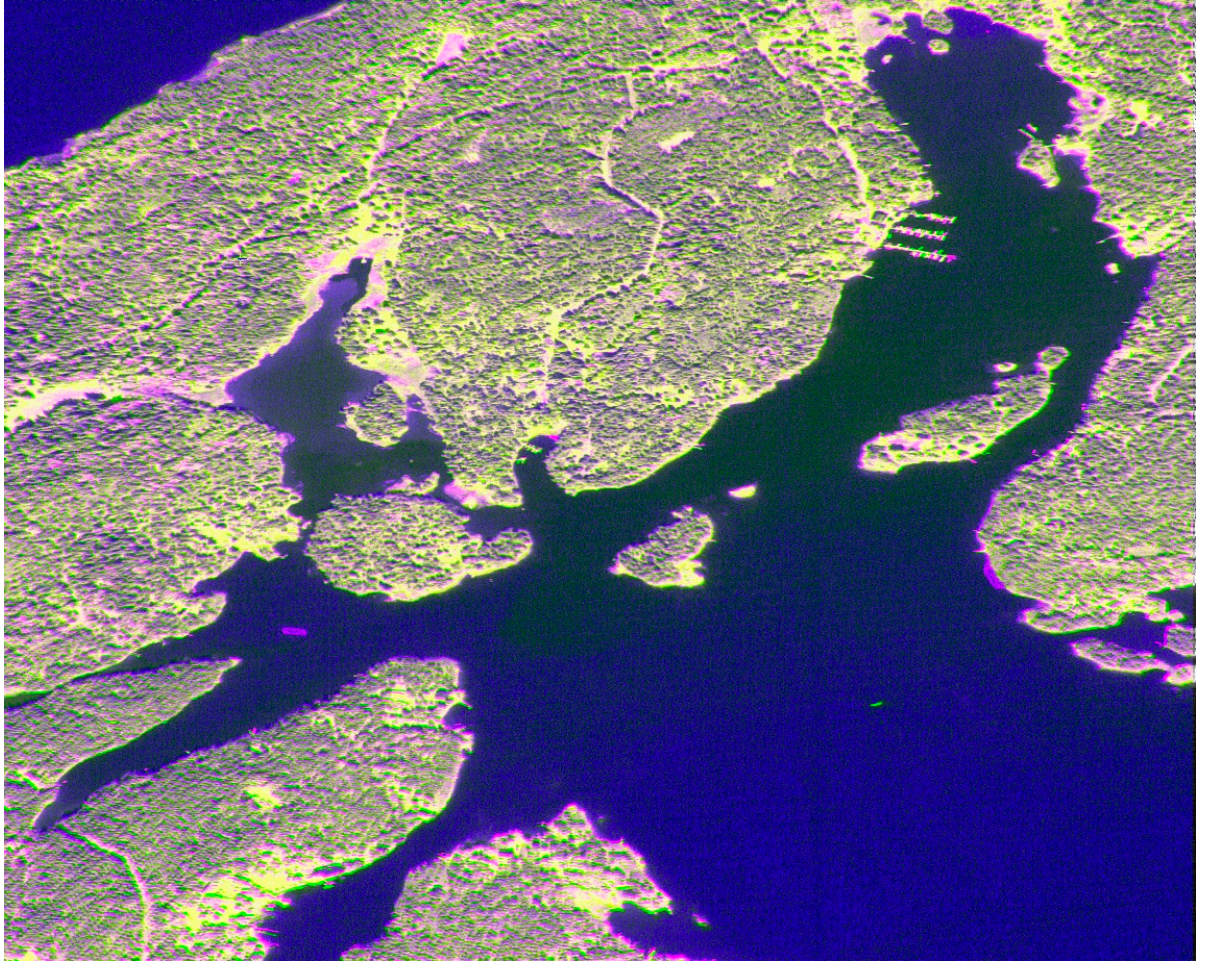


Muokattu



Kuva 60. Kahden kohteen lisääminen 20.6.2006 otettuun kuvaan

Muutostulkinta-työkalua käytettäessä kohteet, jotka ovat alkuperäisessä kuvassa mutta eivät uudessa kuvassa näkyvät vihreällä. Kohteet, jotka ovat uudessa kuvassa mutta eivät alkuperäisellä näkyvät lilana. Kuvasta 61 huomataan heti, että lahdessa olevien kolmen laiturin veneiden paikat ovat muuttuneet ja keskellä vesialuetta on vanhassa kuvassa ollut yksi vene. Kuvaan muokatuista ohjusveneistä merellä oleva näkyy selkeänä ja tukeutuneena oleva näkyy, mutta ei aivan yhtä selkeästi.



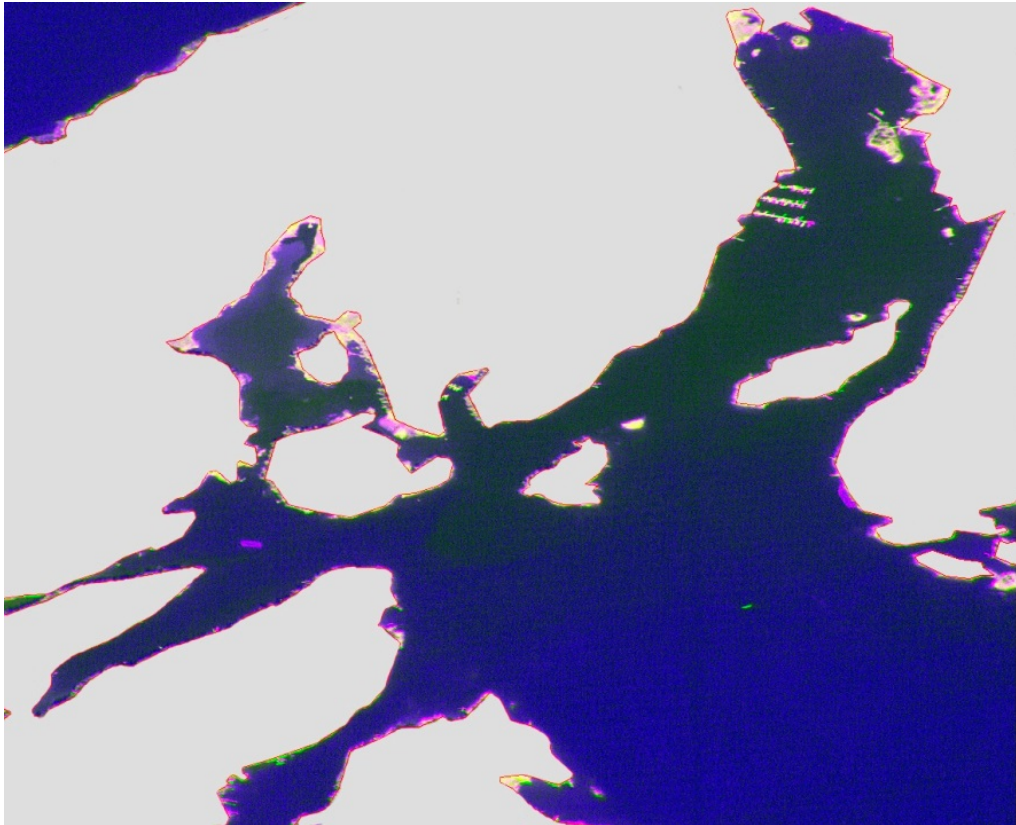
Kuva 61. Muutostulkinta kahden eri päivänä otetun kuvan välillä

Maanmittauslaitoksen Avoimien aineistojen -internet-palvelusta voi ladata koko Suomen rannikon maastokartat, joissa on mukana vesialueiden rajat vektoritasona. Kuvassa 62 vesialueen rajaviiva Porkkalan alueelta.



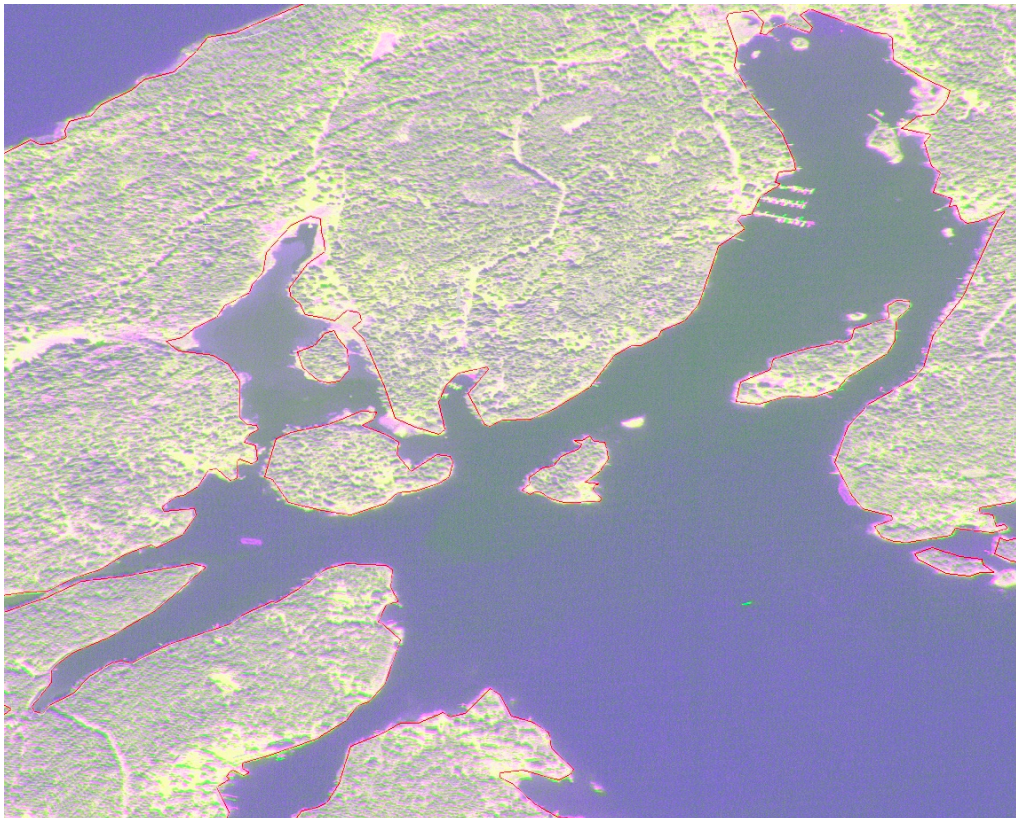
Kuva 62. Maanmittauslaitoksen tuottamat vesialueiden rajat vektoritasona Porkkalan niemen alueelta

Poistetaan maa-alue muutostulkinnasta vesialue-vektoritason avulla (kuva 63):



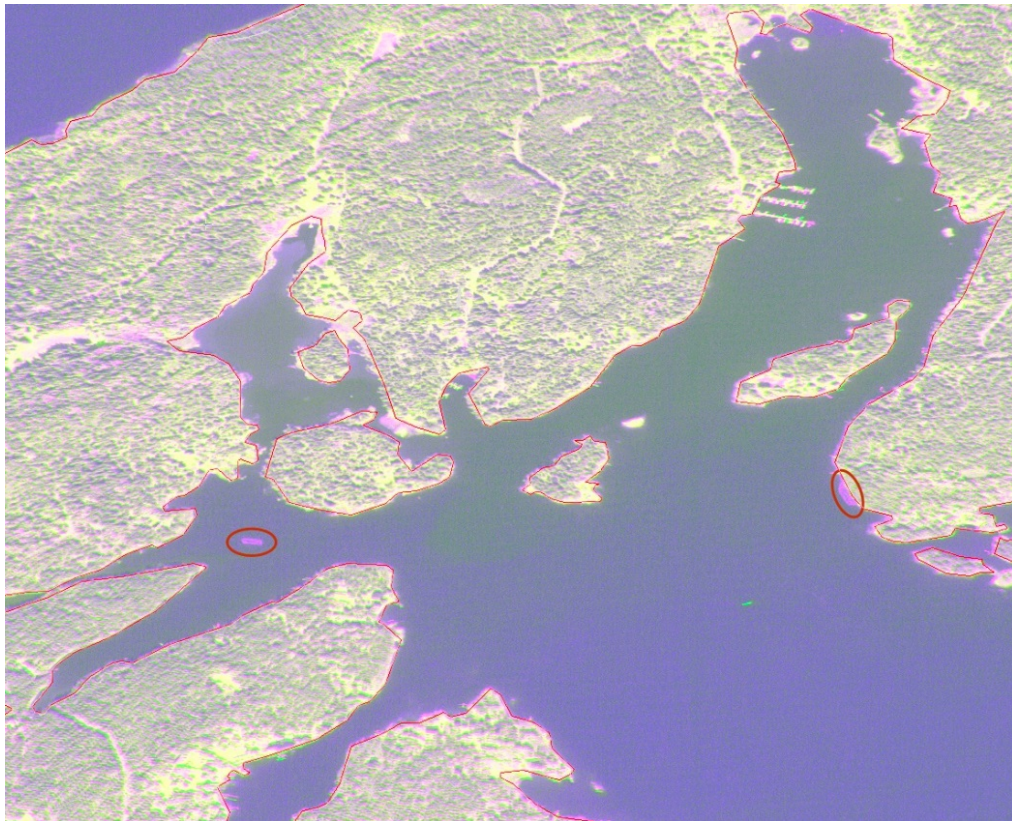
Kuva 63. Maa-alueen poissuodattaminen muutostulkinnasta vektoritason avulla

Vektoritason avulla voidaan lisätä myös pelkästään rantaviiva näkyviin kuvaan (kuva 64):



Kuva 64. Rantaviivan lisääminen muutostulkinnan tulokseen vektoritason avulla

Ylimääräisten kohteiden havaitseminen on kohtuullisen helppoa (kuva 65)



Kuva 65. Kohteiden havaitseminen muutostulkinnan tulokuvasta

Tässä esimerkissä tilanne on ollut erittäin suotuista muutostulkinnalle. Kummassakaan kuvassa ei ole pilvisyyttä valitulla alueella, eikä myöskään huomattavaa merenkäyntiä. Myös nämä ilmiöt näkyisivät muutostulkinnassa, mikäli niitä olisi toisessa kuvassa, jolloin oikeiden muutosten havaitseminen olisi hankalampaa. Täytyy myös huomioda se, että vaikka muutokset ovat näkyvissä kohtuullisen helposti näin pienestä kuvasta, niin oli koko satelliittikuvan alue 240 neliökilometriä. Vaikka alueella olisi muutoksia nähtävissä, vie niiden läpikäyminen vielä silti operaattorilta oman aikansa.

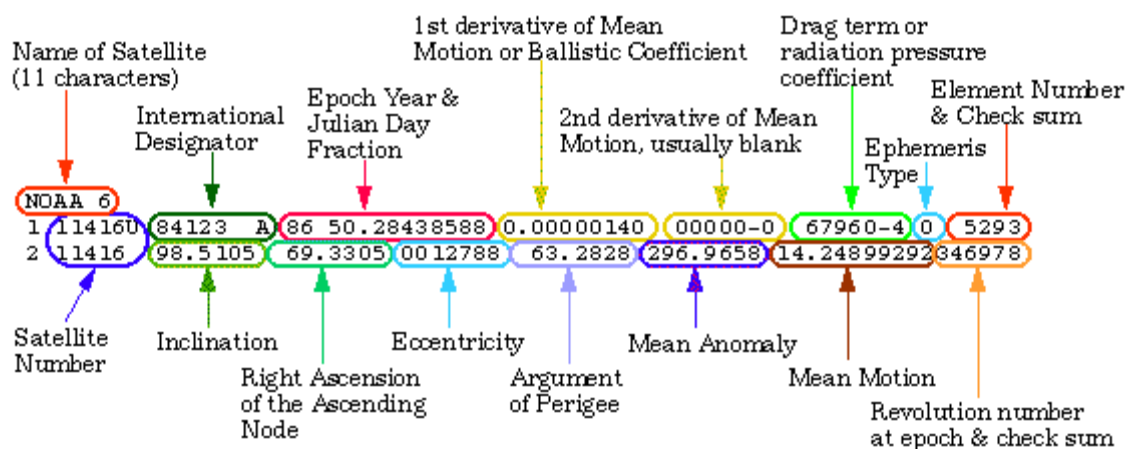
Myös vedenkorkeus vaikuttaa merkittävästi kuvantulkintaan, jos saarten rannoista etsitään ylimääräisiä muotoja. Mikäli vertailtavissa kuvissa vedenkorkeus eroaa selkeästi, näyttää lähes jokaisen saaren ranta hieman erilaiselta. Optimitilanteessa vertailukuvien kirjasto olisi niin laaja, että vertailukuvana käytettäväksi kuvaksi voidaan valita kuva, jossa olosuhteet vastaavat mahdollisimman tarkasti uutta kuvaa. Ottaen huomioon, että Venäjä on suorittanut satelliittitiedustelua jo vuosikymmeniä, voidaan myös olettaa, että kuvakirjasto on varsin laaja. Toisaalta taas vedenkorkeuden muutos ei todennäköisesti siirrä rantaviivaa useita metrejä, kun taas ohjusveneen leveys on noin 8 metriä.

TWO-LINE ELEMENT -KOORINAATTIJÄRJESTELMÄ JA TUTKIMUKSESSA KÄYTETYT RATAPARAMETRIT

Yhdysvaltojen Strategisen komennon (USSTRATCOM) alaisuudessa toimiva Joint Space Operations Center on vastuussa Yhdysvaltojen satelliittiluettelon (SATCAT) ylläpitämisestä, jossa ylläpidetään kaikkien tiedossa olevien satelliittien rataparametreja. Nykyisillä sensoreilla kaikki halkaisijaltaan yli noin 10 cm kokoiset kappaleet kyetään havaitsemaan ja luetteloi-
maan [19A;50A].

Tiedot jaetaan eteenpäin muille käyttäjille internet-sivustolla www.space-track.org. Käyttöehdoissa mainitaan, että joidenkin satelliittien osalta luettelosta saattaa löytyä vain tunnistenumero kansallisen turvallisuuden syistä johtuen [50A]. Nämä ovat oletettavasti Yhdysvaltojen omia tiedustelusatelliitteja. Venäjän tiedustelusatelliittien rataparametrit löytyvät luettelosta. Tietojen päivittäminen säännöllisesti on tärkeää ajantasaisen luettelon ylläpitämiseksi, koska etenkin LEO-ratojen satelliittien korkeus laskee ja ne joutuvat korjaamaan rataansa säännöllisesti [10A]. Yksi tärkeä syy rataparametrien jakamiseen julkisesti on se, että kaupalliset satelliittioperaattorit kykenevät suunnittelemaan omia lentoratojansa siten, että mahdollisilta yhteentörmäyksiltä vältetään kiertoradoilla.

Rataparametrit jaetaan Two-Line Element (TLE) –muodossa (kuva 66). Satelliittien ratojen mallintamiseen tarkoitettut ohjelmat kykenevät suoraan TLE:n tietojen perusteella mallintamaan satelliitin radan ja simuloimaan sitä halutulla aikavälillä.



Kuva 66. TLE-formaatin selitteet [148]

Simuloinneissa käytetyt satelliittien TLE-arvot. Rataparametrit ovat suurimmaksi osaksi päivitetty 23–24.2.2016, jolloin simuloinnit alun perin tehtiin. Venäjä laukaisi kuitenkin maali-kuussa kaksi uutta kuvaussatelliittia (Bars-M2 ja Persona-P3), joten niiden osalta simuloinnit tehtiin myöhemmin ja kaikki tulokset analysoitiin uudestaan. Näiden kahden satelliittien osalta rataparametrit on päivitetty 4.4.2016.

KONDOR

1 39194U 13032A 16054,78354642 ,00008620 00000-0 29774-3 0 9998
2 39194 74,7181 50,2237 0005280 292,4560 128,4366 15,30015448148091

PERSONA-2

1 39177U 13028A 16054,94476577 +,00000093 +00000-0 +33262-4 0 9998
2 39177 098,1972 127,7347 0009044 171,7267 188,4075 14,52781620143810

PERSONA-3

1 40699U 15029A 16054,91180682 +,00000054 +00000-0 +24049-4 0 9998
2 40699 098,2690 103,6517 0014396 282,3516 077,6061 14,52774673035659

BARS-M

1 40420U 15009A 16054,94222313 +,00000252 +00000-0 +25823-4 0 9990
2 40420 097,6830 015,1423 0009070 237,2990 122,7367 14,98659105054273

BARS-M2

1 41394U 16020A 16095,84667078 -,00000060 00000-0 00000+0 0 9993
2 41394 97,6366 35,0587 0032913 227,4861 132,3628 14,98462064 1736

RESURS-DK

1 29228U 06021A 16054,90652258 ,00000911 00000-0 77146-4 0 9995
2 29228 69,9352 237,1790 0005316 319,9724 185,6825 15,01795086536133

RESURS-P1

1 39186U 13030A 16054,96694707 -,00000009 00000-0 21230-5 0 9991
2 39186 97,1660 121,8062 0017343 327,1301 158,1813 15,31754040149194

RESURS-P2

1 40360U 14087A 16054,92608038 +,00001884 +00000-0 +62109-4 0 9998
2 40360 097,2830 150,6416 0008499 276,7456 188,5700 15,32675850065006

RESURS-P3

1 41386U 16016A 16095,64498571 ,00006972 00000-0 22947-3 0 9992
2 41386 97,2803 190,6750 0003989 177,9361 318,3155 15,31807472 3360

KANOPUS-V1

1 38707U 12039A 16054,86961253 -,00020850 00000-0 -97207-3 0 9991
2 38707 97,4678 332,7607 0001697 93,7482 335,5348 15,19869219199250

Simuloinnissa käytettyjen TLE-arvojen lisäksi Space-Track-sivustolta ladattiin kaikkien satelliittien TLE-päivitykset niiden laukaisun jälkeen. Näiden perusteella laskettiin luvussa 5 esitetyt ratamuutokset satelliitin elinkaaren aikana.

VENÄJÄN LAUKAISEMAT SOTILASSATELLIITIT VUODESTA 2001 ALKAEN

Taulukossa on listattuna kaikki Venäjän sotilassatelliittien laukaisut vuoden 2001 alusta alkaen eli noin viimeiseltä 15 vuodelta. Sotilassatelliittien rajana on käytetty Venäjän puolustusministeriön satelliiteille antamaa Kosmos-nimikettä. Kosmos-satelliittien laukaisujen yhteydessä julkisuuteen on pääsääntöisesti annettu vain lausunto laukaisun onnistumisesta ilman muuta tietoa satelliitin tehtävästä tai käyttötarkoituksesta.

Taulukon lähteenä on Yhdysvaltojen ylläpitämä satelliittiluettelo. Se on ladattavissa osoitteesta www.space-track.org. Ladattavissa olevassa luettelossa on kaikkien kiertoradalle olleiden kappaleiden tiedot, yhteensä kohteita löytyy noin 41 000 kappaletta. Tässä ovat mukana myös jo maahan takaisin pudonneet satelliitit. Tähän taulukkoon on koottu luettelosta Venäjän Kosmos-satelliittien 2377–2515 tiedot.

Taulukkoon 11 on merkitty vihreällä satelliitit, joiden kiertorata olisi ratakorkeuden ja inkliinaation perusteella sopiva kuvaussatelliiteille. Inkliinaation rajaksi määritettiin 60°, koska sitä pienemmillä arvoilla ei Suomen alueelle voida kuvata, eikä niistä täten muodostu myöskään tiedustelu-uhkaa. Ratakorkeuden ylärajaksi määritettiin 900 km, koska toisaalta se on todettu tutkimuksessa aiemmin yleiseksi kuvaussatelliittien ratakorkeuden ylärajaksi ja toisaalta siksi, koska korkeus vaikuttaa suoraan erottelukyvyn heikentymiseen.

Keltaisella on merkitty satelliitit, jotka rataparametrien perusteella sopisivat kuvaussatelliiteiksi, mutta sitä voidaan muista syistä pitää epätodennäköisenä. Näiden kolmen satelliitin tutkapoikkipinta-ala (RCS) on alle yksi neliometri. Käyttämällä aikaisemmin tutkimuksessa esitettyjä kaavoja satelliitin optisen erotuskyvyn laskemiseksi ja olettaen, että sensorielementti olisi samankokoinen kuin kaupallisissa satelliiteissa, voidaan todeta, ettei kyseessä todennäköisesti ole ainakaan korkearesoluutiainen kuvaussatelliitti. Edes viiden metrin resoluution saavuttaminen vaatisi kyseisillä ratakorkeuksilla optiikalta noin 1,5 metrin polttoväliä, joka ei liene todennäköistä satelliitin kokoon nähden. Tutkasatelliittien resoluutio muodostuu eri tekijöistä, mutta nykyteknologia ei mahdollista vielä riittävää energian tuottoa tutkalaitteelle pienoisatelliitissa. Lisäksi muut kuvaukseen sopivilla kiertoradoilla olevat satelliitit ovat tutkapoikkipinta-alaltaan pääsääntöisesti yli kymmenkertaisia. Internetissä olevat arviot siitä, että kaikki kolme satelliittia on tarkoitettu ilmapuolustustutkien kalibrointiin ja testaamiseen lienevät todennäköisempiä vaihtoehtoja satelliittien käyttötarkoituksilla [59B;60B;61B].

Punaisella merkityt ovat satelliitteja, joiden kiertorata olisi sopinut kuvaustiedusteluun, mutta jotka ovat jo pudonneet takaisin Maahan. Eräiden arvioiden mukaan suurin osa näistä olisi ollut optisia tiedustelusatelliitteja, jolloin niiden lyhyttä elinkaarta voisi selittää myös filmi-kapselien rajallisella määrällä [55B;56B].

Taulukko 11: Venäjän laukaisemat sotilassatelliitit vuodesta 2001 alkaen

Nimike	Elinkaari		Inklinaatio	Apogeum	Perigeum	RCS
Kosmos 2377	29.5.01	10.10.01	67,10	261,00	170,00	11,92
Kosmos 2378	8.6.01		82,90	1011,00	960,00	1,89
Kosmos 2379	24.8.01		9,70	35798,00	35748,00	5,62
Kosmos 2380	1.12.01		62,90	19138,00	19121,00	2,00
Kosmos 2381	1.12.01		63,00	19220,00	19039,00	3,99
Kosmos 2382	1.12.01		63,00	19146,00	19114,00	3,16
Kosmos 2383	21.12.01	20.3.04	65,00	155,00	126,00	22,00
Kosmos 2384	28.12.01		82,60	1432,00	1415,00	0,95
Kosmos 2385	28.12.01		82,50	1426,00	1415,00	0,86
Kosmos 2386	28.12.01		82,50	1417,00	1416,00	0,92
Kosmos 2387	25.2.02	27.6.02	67,10	297,00	168,00	17,41
Kosmos 2388	1.4.02	14.9.11	64,80	314,00	59,00	2,00
Kosmos 2389	28.5.02		83,00	1016,00	948,00	2,02
Kosmos 2390	8.7.02		82,50	1507,00	1468,00	0,90
Kosmos 2391	8.7.02		82,50	1506,00	1466,00	0,89
Kosmos 2392	25.7.02		63,40	1993,00	1309,00	20,16
Kosmos 2393	24.12.02	22.12.13	63,90	1031,00	84,00	3,98
Kosmos 2394	25.12.02		65,10	19134,00	19126,00	3,99
Kosmos 2395	25.12.02		65,20	19154,00	19106,00	3,98
Kosmos 2396	25.12.02		65,10	19159,00	19101,00	3,98
Kosmos 2397	24.4.03		8,40	35912,00	35554,00	7,94
Kosmos 2398	4.6.03		83,00	1015,00	969,00	1,94
Kosmos 2399	12.8.03	9.12.03	64,90	247,00	175,00	10,00
Kosmos 2400	19.8.03		82,50	1502,00	1467,00	0,92
Kosmos 2401	19.8.03		82,50	1502,00	1466,00	0,97
Kosmos 2402	10.12.03		63,20	19219,00	19041,00	3,98
Kosmos 2403	10.12.03		63,20	19232,00	19027,00	5,01
Kosmos 2404	10.12.03		63,20	19225,00	19037,00	3,35
Kosmos 2405	28.5.04	16.6.06	65,00	144,00	122,00	19,09
Kosmos 2406	10.6.04		71,00	864,00	845,00	12,43
Kosmos 2407	22.7.04		83,00	1007,00	949,00	1,87
Kosmos 2408	23.9.04		82,50	1495,00	1471,00	0,90
Kosmos 2409	23.9.04		82,50	1494,00	1475,00	0,94
Kosmos 2410	24.9.04	9.1.05	67,10	288,00	183,00	7,94
Kosmos 2411	26.12.04		63,10	19155,00	19104,00	3,98
Kosmos 2412	26.12.04		63,10	19141,00	19118,00	3,98
Kosmos 2413	26.12.04		63,10	19144,00	19116,00	3,16
Kosmos 2414	20.1.05		83,00	966,00	909,00	1,85
Kosmos 2415	2.9.05	16.10.05	64,90	310,00	205,00	5,01
	21.12.05		82,50	1447,00	1437,00	1,54

Kosmos 2416						
Kosmos 2417	25.12.05		65,30	19171,00	19089,00	3,99
Kosmos 2418	25.12.05		65,30	19169,00	19090,00	3,99
Kosmos 2419	25.12.05		65,30	19170,00	19088,00	3,32
Kosmos 2420	3.5.06	19.7.06	67,10	270,00	169,00	11,01
Kosmos 2421	25.6.06	19.8.10	65,00	148,00	120,00	9,26
Kosmos 2422	21.7.06		64,50	38746,00	1571,00	3,98
Kosmos 2423	14.9.06	23.11.06	64,90	284,00	202,00	10,77
Kosmos 2424	25.12.06		65,70	19166,00	19093,00	5,04
Kosmos 2425	25.12.06		65,70	19189,00	19070,00	5,01
Kosmos 2426	25.12.06		65,70	19168,00	19092,00	5,98
Kosmos 2427	7.6.07	22.8.07	67,10	347,00	177,00	10,88
Kosmos 2428	29.6.07		71,00	859,00	843,00	6,43
Kosmos 2429	11.9.07		83,00	1010,00	955,00	1,65
Kosmos 2430	23.10.07		64,60	39844,00	549,00	3,98
Kosmos 2431	26.10.07		65,30	19164,00	19079,00	2,51
Kosmos 2432	26.10.07		65,30	19163,00	19097,00	2,55
Kosmos 2433	26.10.07		65,30	19142,00	19117,00	5,01
Kosmos 2434	25.12.07		65,30	19138,00	19122,00	4,88
Kosmos 2435	25.12.07		65,30	19189,00	19069,00	3,98
Kosmos 2436	25.12.07		65,30	19178,00	19082,00	5,01
Kosmos 2437	23.5.08		82,50	1511,00	1480,00	0,88
Kosmos 2438	23.5.08		82,50	1508,00	1477,00	0,94
Kosmos 2439	23.5.08		82,50	1509,00	1478,00	0,89
Kosmos 2440	27.6.08		3,80	35804,00	35769,00	14,06
Kosmos 2441	26.7.08		98,00	733,00	708,00	20,95
Kosmos 2442	25.9.08		65,20	19188,00	19070,00	4,13
Kosmos 2443	25.9.08		65,20	19176,00	19084,00	3,99
Kosmos 2444	25.9.08		65,20	19189,00	19069,00	3,98
Kosmos 2445	14.11.08	23.2.09	67,20	277,00	188,00	9,32
Kosmos 2446	2.12.08		65,80	39697,00	653,00	3,16
Kosmos 2447	25.12.08		64,00	19138,00	19119,00	3,16
Kosmos 2448	25.12.08		64,00	19139,00	19118,00	4,98
Kosmos 2449	25.12.08		63,90	19191,00	19070,00	3,17
Kosmos 2450	29.4.09	27.7.09	67,10	282,00	180,00	10,73
Kosmos 2451	6.7.09		82,50	1509,00	1497,00	0,79
Kosmos 2452	6.7.09		82,50	1507,00	1482,00	1,46
Kosmos 2453	6.7.09		82,50	1506,00	1495,00	0,84
Kosmos 2454	21.7.09		83,00	943,00	917,00	1,27
Kosmos 2455	20.11.09		67,20	908,00	902,00	12,12
Kosmos 2456	14.12.09		64,20	19139,00	19121,00	4,42
Kosmos 2457	14.12.09		64,20	19149,00	19111,00	6,01
Kosmos 2458	14.12.09		64,20	19137,00	19122,00	5,01
Kosmos 2459	1.3.10		65,20	19204,00	19056,00	3,98
Kosmos 2460	1.3.10		65,20	19136,00	19124,00	3,98
Kosmos 2461	1.3.10		65,20	19140,00	19119,00	3,16
Kosmos 2462	16.4.10	21.7.10	67,20	270,00	180,00	12,55
Kosmos 2463	27.4.10		83,00	1022,00	967,00	1,77
Kosmos 2464	2.9.10		64,90	19113,00	19015,00	5,01

Kosmos 2465	2.9.10		64,90	19214,00	19046,00	5,01
Kosmos 2466	2.9.10		64,90	19176,00	19083,00	4,10
Kosmos 2467	8.9.10		82,50	1496,00	1493,00	1,68
Kosmos 2468	8.9.10		82,50	1502,00	1480,00	1,47
Kosmos 2469	30.9.10		64,90	39223,00	1195,00	3,16
Kosmos 2470	1.2.11	15.7.13	99,40	137,00	121,00	3,57
Kosmos 2471	26.2.11		65,20	19153,00	19107,00	7,94
Kosmos 2472	27.6.11	24.10.11	81,40	242,00	201,00	12,00
Kosmos 2473	20.9.11		0,00	35796,00	35777,00	5,79
Kosmos 2474	2.10.11		64,50	19145,00	19115,00	3,16
Kosmos 2475	4.11.11		64,50	19176,00	19083,00	5,98
Kosmos 2476	4.11.11		64,50	19167,00	19093,00	6,61
Kosmos 2477	4.11.11		64,50	19162,00	19098,00	5,57
Kosmos 2478	28.11.11		65,20	19168,00	19093,00	3,98
Kosmos 2479	30.3.12		0,80	35789,00	35757,00	12,59
Kosmos 2480	17.5.12	24.9.12	81,30	269,00	197,00	13,00
Kosmos 2481	28.7.12		82,50	1511,00	1482,00	0,90
Kosmos 2482	15.1.13		82,50	1515,00	1474,00	1,76
Kosmos 2483	15.1.13		82,50	1502,00	1478,00	2,28
Kosmos 2484	15.1.13		82,50	1514,00	1475,00	1,52
Kosmos 2485	26.4.13		64,70	19168,00	19092,00	5,01
Kosmos 2486	7.6.13		98,20	723,00	710,00	16,26
Kosmos 2487	27.6.13		74,70	480,00	472,00	7,95
Kosmos 2488	25.12.13		82,50	1511,00	1478,00	1,57
Kosmos 2489	25.12.13		82,50	1513,00	1476,00	1,75
Kosmos 2490	25.12.13		82,50	1512,00	1476,00	1,69
Kosmos 2491	25.12.13		82,50	1510,00	1481,00	0,36
Kosmos 2492	23.3.14		65,10	19173,00	19087,00	3,16
Kosmos 2493	28.12.13		82,40	617,00	593,00	0,68
Kosmos 2494	28.12.13		82,40	616,00	586,00	0,68
Kosmos 2495	6.5.14	3.9.14	81,40	250,00	205,00	13,49
Kosmos 2496	23.5.14		82,50	1510,00	1478,00	1,72
Kosmos 2497	23.5.14		82,50	1511,00	1477,00	1,75
Kosmos 2498	23.5.14		82,50	1512,00	1477,00	1,78
Kosmos 2499	23.5.14		82,40	1503,00	1152,00	0,37
Kosmos 2500	14.6.14		65,00	19148,00	19111,00	5,45
Kosmos 2501	30.11.14		64,70	19173,00	19087,00	8,13
Kosmos 2502	25.12.14		67,20	909,00	901,00	13,25
Kosmos 2503	27.2.15		97,70	577,00	565,00	5,72
Kosmos 2504	31.3.15		82,50	1506,00	1173,00	0,25
Kosmos 2505	5.6.15	18.9.15	81,40	328,00	205,00	14,60
Kosmos 2506	23.6.15		98,30	727,00	706,00	15,04
Kosmos 2507	23.9.15		82,50	1501,00	1487,00	1,54
Kosmos 2508	23.9.15		82,50	1505,00	1484,00	1,46
Kosmos 2509	23.9.15		82,50	1507,00	1482,00	1,47
Kosmos 2510	17.11.15		63,80	38835,00	1517,00	22,17
Kosmos 2511	5.12.15	8.12.15	98,20	298,00	88,00	3,31
Kosmos 2512	5.12.15		98,20	694,00	683,00	0,75

Kosmos 2513	13.12.15	0,00	35804,00	35769,00	3,36
Kosmos 2514	7.2.16	64,80	19156,00	19104,00	7,91
Kosmos 2515	24.3.16	97,62	594,00	549,00	-

Jäljelle jääneet kymmenen satelliittia voisivat olla siis käytössä olevia kuvaussatelliitteja (Kosmos-2455 ja Kosmos-2502 otettiin mukaan, koska ratakorkeus on tarpeeksi lähellä raja-arvoa). Ainakin joidenkin arvioiden mukaan Kosmos-2406 ja Kosmos-2486 ovat kuitenkin Tselina-2-tyyppin elektronisen tiedustelun satelliitteja [63B;64B;65B]. Kosmos-2455 ja Kosmos-2502 ovat taas arvioiden mukaan uudempia Lotos-tyyppin elektronisen tiedustelun satelliitteja [66B;67B;68B;69B;70B]. Venäläisen KB Arsenal -suunnittelutoimiston sivuilla on mainoskuva elektroniseen tiedusteluun tarkoitettusta satelliitista, jossa kiertoradan korkeudeksi on merkitty 900 km ja inkliinaatioksi 67° [71B]. Tämä täsmää Kosmos-2455 ja Kosmos-2502 -satelliittien ratoihin. Kaikki neljä tässä mainittua satelliittia ovat kuvaussatelliiteille yleisen ratakorkeuden yläpäässä, mikä resoluution näkökulmasta puoltaa sitä, että ne eivät olisi aina-kaan optisen alueen korkean resoluution kuvaussatelliitteja. Mikään näistä neljästä satelliitista ei myöskään inkliinaation osalta täytä aurinkosynkronisen radan vaatimuksia, joilla suurin osa optisen alueen kuvaussatelliiteista toimii. Toisaalta on huomioitava, että tutkasatelliittien resoluutio muodostuu eri tavalla ja aurinkosynkronisuudesta ei ole hyötyä tutkasatelliiteille. Mikään julkisista lähteistä ei kuitenkaan viittaa siihen, että nämä olisivat tutkasatelliitteja.

Loppujen kuuden satelliitin osalta ei ole syytä epäillä, että ne eivät olisi kuvaussatelliitteja. Näitä viittä satelliittia (Kosmos-2441, Kosmos-2486, Kosmos-2487, Kosmos-2503, Kosmos-2506 ja Kosmos-2515) käsitellään tarkemmin tutkimuksen luvussa 5.

SIMULOINNIN TARKEMMAT TULOKSET KUUKAUSITTAIN

Tässä liitteessä on esitetty tarkemmin simuloinnin tuloksena saadut teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet optisen alueen satelliiteille. Tutkasatelliitin tulokset eivät ole mukana taulukoissa koska niiden osalta teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet eivät eroa toisistaan. Lisäksi Venäjän ainoa tutkasatelliitti ei ole arvioiden mukaan toimintakuntoinen.

Tuloksia tarkasteltaessa on huomionarvoista se, etteivät arvot ole todennäköisesti ole täysin paikkaansa pitäviä. Näitä mahdollisia virhetekijöitä käsiteltiin luvussa 6. Käytännössä erityisesti taulukoissa oleviin vuorokauden ensimmäisen ja viimeisen kuvauksen kellonaikoihin tulee suhtautua varauksella. Ne pitävät paikkansa simuloinnissa käytetyillä rataparametreilla, mutta koska satelliittien rataa lähes varmasti korjataan vuoden aikana, muuttuvat myös tarkat kellonajat muuttuvat ratakorjausten seurauksena. Kellonaikoja voidaan pitää kuitenkin suuntaa antavina, jos niihin suhtaudutaan esimerkiksi tunnin tarkkuudella.

Myös pilvisyyden ja sitä kautta mahdollisten kuvaustodennäköisyyksien osalta tuloksiin tulee suhtautua varauksella. Nyt pilvisyyden todennäköisyyttä jokaisena ajanhetkenä simuloitiin 100 kertaa, jolloin siitä tuloksena saatuja keskiarvoja voidaan pitää kohtalaisen luotettavina. Mahdollisesti suurempi epävarmuustekijä tulee kuitenkin pilvisyyden simulointitavasta. Simulointi tehtiin luvussa 6 kuvatulla tavalla, jossa säätila saattoi vaihtua aina kuuden tunnin välein. Säätila simuloitiin kuukausittaisen pilvisyydettodennäköisyyden mukaan painotetulla satunnaislukuarvonnalla. Muuttamalla säätilan simulointiväliä tai arvontatapaa, tulokset olisivat mahdollisesti hieman erilaisia. Tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina, jolloin niitä ei tule pitää absoluuttisen oikeina arvoina.

Taulukoissa teoreettisella kuvausmäärällä tarkoitetaan kaikkien optisen alueen satelliittien yhteenlaskettua mahdollista vuorokausittaista kuvausmäärää. Tästä poiketen, todennäköisellä kuvausmäärällä ei tarkoiteta aivan sama asiaa. Sillä tarkoitetaan keskiarvoa kuvausten määrästä, mikäli kuvaus ylipäättänsä onnistuu. Esimerkiksi 3.1.2016 todennäköisten kuvausten määrä on 3 / vrk ja yhden tai useamman kuvauksen onnistumisen todennäköisyys 17 %. Tämä tarkoittaa, että todennäköisesti vain noin kerran kuudessa vuodessa kyseisenä päivänä kyetään kuvaamaan, mutta silloin saadaan keskimäärin kolme kuvaa vuorokauden aikana. Kyseisenä päivänä yli yhden ja yli kolmen kuvauksen todennäköisyys on sama, koska kaikki kuvaukset

taphtuvat tunnin sisällä, joten säätila ei simuloinnissa ehdi vaihtua. Viittä tai useampaa kuvaa ei voida saada, koska vain kolme satelliittia ylittää kohdealueen valoisaan aikaan.

Väli edellisen vuorokauden kuvaukseen tarkoittaa aikaa tunteina, joka kuluu edellisen vuorokauden viimeisestä kuvauksesta kyseisen vuorokauden ensimmäiseen kuvaukseen. Käytännössä tämä ajanjakso on väli, jolloin alusta kohtaan ei muodostu minkäänlaista tiedusteluuhkaa optisen alueen satelliittien osalta. Vuorokauden ensimmäisen ja viimeisen kuvauksen kellonajoissa on huomioitu kaikkien satelliittien kuvausmahdollisuudet. Esimerkiksi taas 3. tammikuuta ensimmäisen kuvaus ollessa klo 13:01 ja viimeisen klo 13:50, tämä tarkoittaa sitä, että kaikki kolme vuorokauden mahdollista kuvausta suoritetaan noiden 49 minuutin aikana. Tämän jälkeen tulee noin 23 tunnin tauko ennen seuraavaa mahdollista kuvausta. Kuten aiemmin on mainittu, kellonaikoihin ei tule suhtautua kuitenkaan varauksettomasti mahdollisten ratakorjausten takia.

Taulukoiden lisäksi kuukausittain on esitetty myös kuva satelliittien teoreettisista kuvausmahdollisuuksista ja yksi esimerkkisimulointi sääolosuhteiden vaikutuksista. Kuvassa jokainen satelliitti on omalla rivillänsä ja kuvausmahdollisuudet on esitetty viivalla päivämäärän kohdalla. Kuvassa näkyvät myös tutkasatelliitin kuvausmahdollisuudet, jotka ovat esitetty punaisella viivalla. Optisen alueen satelliittien kuvausmahdollisuudet ovat esitetty sinisellä viivalla. Taustalla näkyvät keltaiset pystypalkit kuvaavat aikaa, jolloin auringon korkeuskulma on yli seitsemän astetta, eli optisen alueen satelliitit kykenevät kuvaamaan. Alhaalla kuvassa näkyvät päivämäärät ja ruudukko ovat siinä, missä vuorokausi vaihtuu.

Esimerkkisimulointikuvat ovat mukana havainnollistamassa, miten sääolosuhteet voivat josakin tilanteessa vaikuttaa teoreettisiin kuvausmahdollisuuksiin. Näitä tarkasteltaessa täytyy kuitenkin huomioida se, että kyseessä on vain yksi satunnainen simulointikierros sääolosuhteiden vaikutuksesta. Tämän takia esimerkkisimulointikuva saattaa näyttää hyvinkin erilaiselta kuin taulukosta näkyvät 100 simulointikierroksen perusteella tehdyt keskiarvot. Yhdellä simulointikierroksella on esimerkiksi mahdollista se, että lähes jokaisena päivänä paistaisi aurinko, vaikka se tilastollisesti olisi hyvin epätodennäköistä.

TAMMIKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

Taulukko 12. Tammikuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

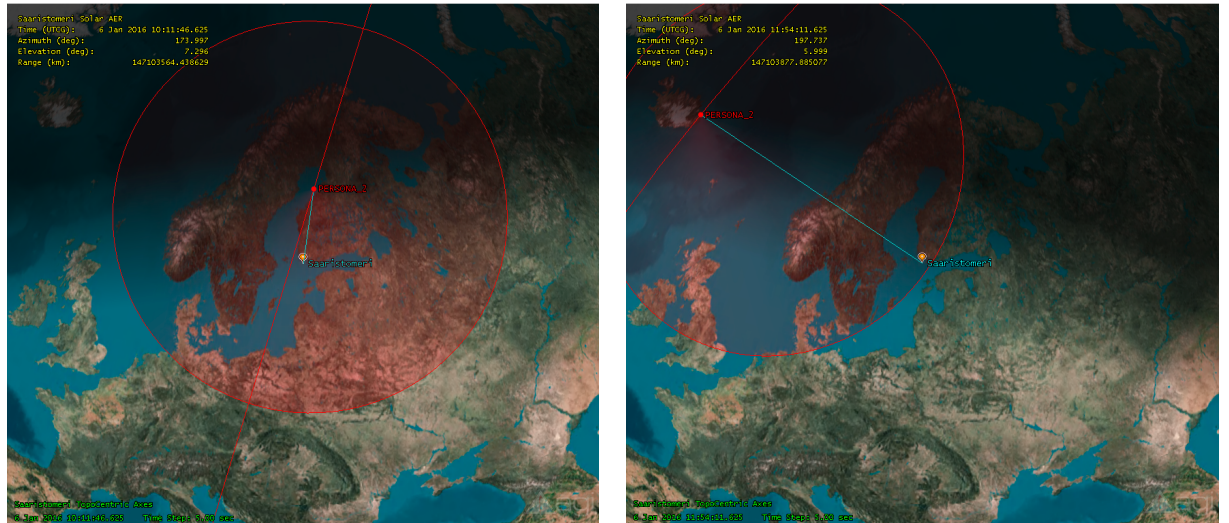
Tammikuu 2016									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.1.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %			
2.1.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %			
3.1.2016	3	3	17 %	17 %	0 %	0 %		13:01	13:50
4.1.2016	3	3	24 %	24 %	0 %	0 %	23,00	13:01	13:50
5.1.2016	5	4	13 %	13 %	0 %	0 %	22,50	12:08	13:51
6.1.2016	5	4	19 %	19 %	0 %	0 %	22,50	12:09	13:52
7.1.2016	5	4	20 %	20 %	0 %	0 %	22,50	12:10	13:53
8.1.2016	5	4	16 %	16 %	0 %	0 %	22,50	12:10	13:54
9.1.2016	5	4	21 %	21 %	0 %	0 %	22,50	12:11	13:55
10.1.2016	5	4	19 %	19 %	0 %	0 %	22,50	12:12	13:56
11.1.2016	4	4	24 %	24 %	0 %	0 %	22,50	12:13	13:41
12.1.2016	4	4	22 %	22 %	0 %	0 %	22,50	12:14	13:42
13.1.2016	4	4	16 %	16 %	0 %	0 %	22,50	12:14	13:43
14.1.2016	5	4	16 %	16 %	0 %	0 %	22,50	12:15	14:50
15.1.2016	5	4	14 %	14 %	0 %	0 %	21,50	12:16	14:50
16.1.2016	6	5	21 %	21 %	21 %	0 %	21,50	12:17	14:51
17.1.2016	6	5	21 %	21 %	21 %	0 %	21,50	12:18	14:52
18.1.2016	6	5	12 %	12 %	12 %	0 %	21,50	12:18	14:53
19.1.2016	9	5	35 %	35 %	21 %	7 %	20,00	11:01	14:54
20.1.2016	8	4	36 %	24 %	24 %	4 %	20,00	11:02	14:55
21.1.2016	9	5	29 %	29 %	21 %	2 %	20,00	11:03	14:56
22.1.2016	8	4	36 %	26 %	26 %	4 %	20,00	11:04	14:56
23.1.2016	9	4	32 %	32 %	16 %	1 %	20,00	11:05	14:57
24.1.2016	8	4	35 %	20 %	20 %	9 %	20,00	11:06	14:58
25.1.2016	9	5	27 %	27 %	15 %	6 %	20,00	11:07	14:59
26.1.2016	7	4	35 %	17 %	17 %	3 %	20,00	11:08	13:52
27.1.2016	8	5	24 %	24 %	14 %	3 %	21,50	11:08	13:53
28.1.2016	9	3	36 %	14 %	14 %	3 %	21,50	11:09	15:35
29.1.2016	10	5	39 %	39 %	19 %	7 %	19,50	11:07	15:36
30.1.2016	9	4	25 %	16 %	16 %	0 %	19,50	11:11	15:37
31.1.2016	10	5	34 %	34 %	18 %	5 %	19,50	11:03	15:38

Taulukosta 12 ja kuvasta 68 nähdään, että tammikuun ensimmäisinä päivinä optisen alueen satelliittikuvaus ei onnistu kohdealueella, koska aurinko ei ikinä nouse yli seitsemän asteen kulmaan. Sääolosuhteiden takia (valoisasta ajasta 81 % on pilvistä) kuvausten onnistuminen on varsin epätodennäköistä muutenkin tammikuun aikana. Kuvan 68 esimerkkisimuloinnista nähdään se, että kuvausmahdollisuuksia on kuukauden aikana vain yksittäisinä päivinä. Tammikuu on erittäin huonoa aikaa Suomessa optisen alueen satelliittikuvaukselle.

Vuorokausittainen väli kuvauksissa pienenee hieman kuun loppua kohti. Alkukuusta se on noin 23 tuntia, kun loppukuusta enää vain noin 20 tuntia. Vuorokauden ensimmäinen kuvausmahdollisuus on noin klo 12:00 ja viimeinen kuvausmahdollisuus noin klo 15:00.

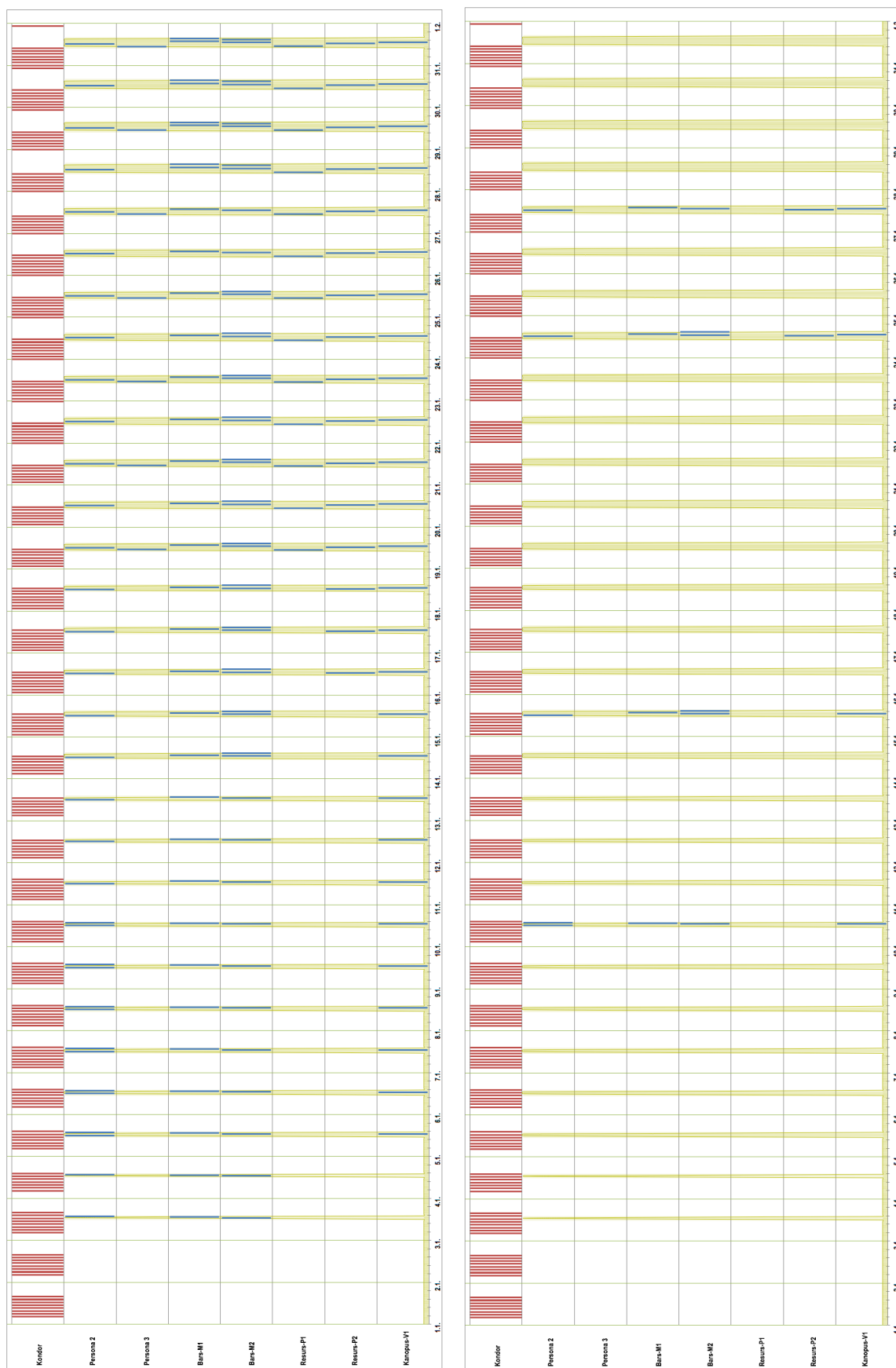
Kuvasta 68 nähdään, että Persona 2, Bars-M1 ja Bars-M2 -satelliiteilla on useina päivinä teoreettisesti kaksi peräkkäistä kuvausmahdollisuutta. Tämä johtuu simuloinnissa käytetystä sotilasatelliittien suuremmasta maksimikuvauskulmasta. Suurempi kuvauskulma mahdollistaa

kohteen kuvaamisen jo varsinaista ylitystä aikaisemmalta tai seuraavalta ratakiekkokselta. Tätä on havainnollistettu kuvassa 67.



Kuva 67. Persona 2 -satelliitin rata ja sensorin kattama alue 6.1.2016 klo 12:09 ja 13:52

Tammikuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkkisimulointi sääolosuhteiden mahdollisesta vaikutuksesta



Kuva 68. Tammikuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi

HELMIKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

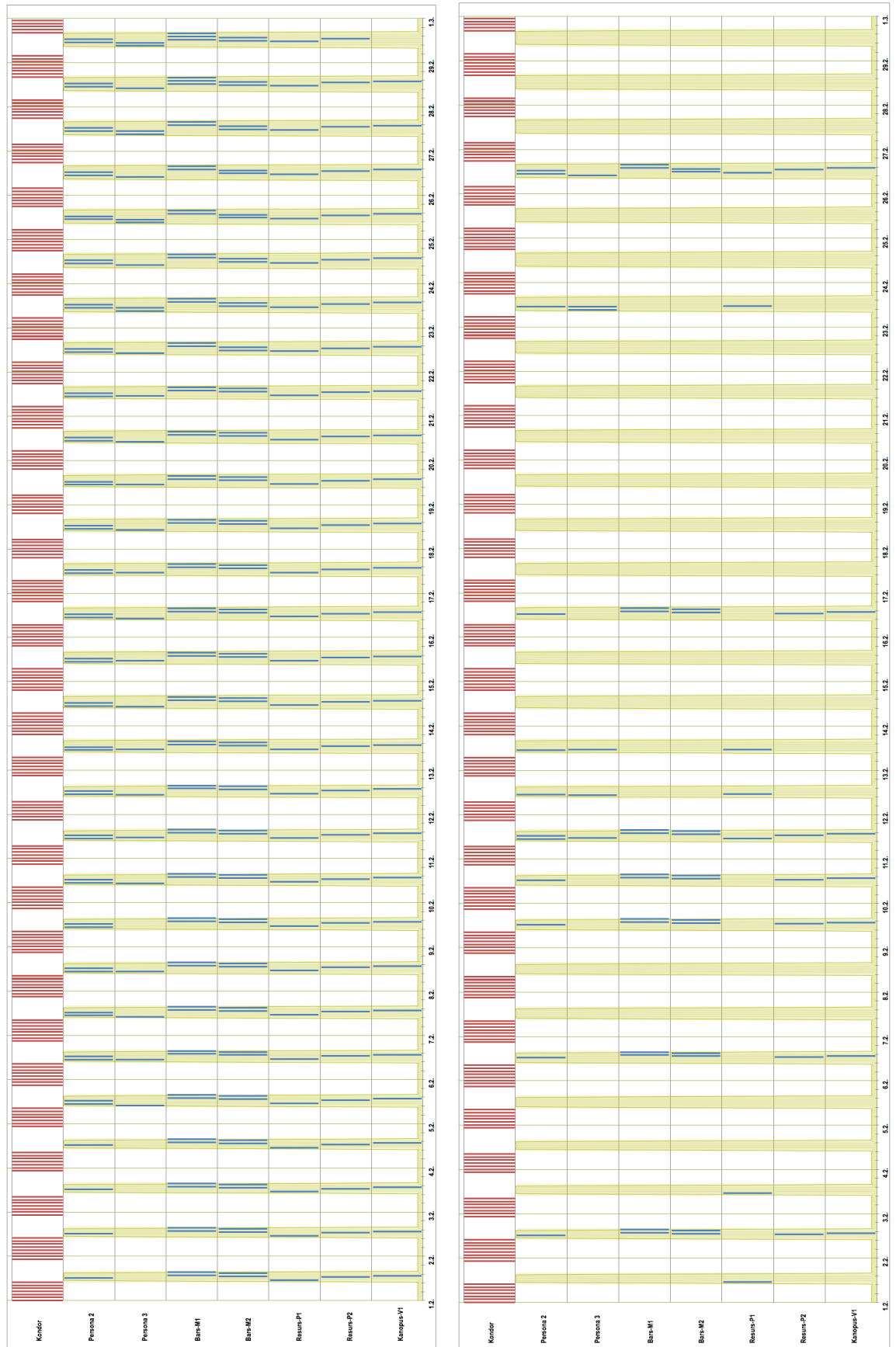
Taulukko 13. Helmikuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

Helmikuu 2016									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.2.2016	9	4	38 %	22 %	22 %	6 %	19,50	11:13	15:39
2.2.2016	9	4	54 %	24 %	24 %	9 %	19,50	11:14	15:40
3.2.2016	9	4	47 %	29 %	29 %	6 %	19,50	11:15	15:40
4.2.2016	9	3	46 %	16 %	16 %	3 %	19,50	11:16	15:41
5.2.2016	11	5	47 %	47 %	25 %	3 %	18,50	10:04	15:42
6.2.2016	11	5	54 %	54 %	34 %	7 %	19,00	10:52	15:43
7.2.2016	11	5	47 %	47 %	26 %	8 %	18,50	10:01	15:44
8.2.2016	11	5	43 %	43 %	24 %	4 %	19,00	10:48	15:45
9.2.2016	10	5	34 %	34 %	24 %	7 %	19,00	10:55	15:46
10.2.2016	11	5	44 %	44 %	24 %	6 %	19,00	10:44	15:47
11.2.2016	11	5	44 %	44 %	26 %	6 %	19,00	10:56	15:47
12.2.2016	11	5	42 %	42 %	26 %	3 %	19,00	10:40	15:48
13.2.2016	11	5	47 %	47 %	29 %	8 %	19,00	10:58	15:49
14.2.2016	11	5	39 %	39 %	19 %	6 %	19,00	10:37	15:50
15.2.2016	11	5	47 %	47 %	27 %	7 %	19,00	10:59	15:51
16.2.2016	11	5	43 %	43 %	24 %	5 %	18,50	10:33	15:52
17.2.2016	11	5	54 %	54 %	31 %	3 %	19,00	11:01	15:53
18.2.2016	11	5	43 %	43 %	24 %	4 %	18,50	10:29	15:54
19.2.2016	11	5	44 %	44 %	31 %	6 %	19,00	11:02	15:55
20.2.2016	11	5	40 %	40 %	20 %	7 %	18,50	10:25	15:56
21.2.2016	11	5	52 %	52 %	33 %	5 %	19,00	11:04	15:57
22.2.2016	11	5	44 %	44 %	27 %	7 %	18,50	10:21	15:58
23.2.2016	12	5	40 %	40 %	20 %	3 %	17,50	9:31	15:58
24.2.2016	11	5	50 %	50 %	30 %	9 %	18,50	10:18	15:59
25.2.2016	12	5	53 %	53 %	30 %	4 %	17,50	9:27	16:00
26.2.2016	11	5	48 %	48 %	25 %	10 %	18,00	10:14	16:01
27.2.2016	12	5	51 %	51 %	30 %	6 %	17,50	9:23	16:02
28.2.2016	12	5	48 %	48 %	24 %	7 %	18,00	10:10	16:03
29.2.2016	12	5	42 %	42 %	7 %	7 %	17,50	9:20	16:05

Kuvausmahdollisuuksien todennäköisyys kasvaa hieman tammikuuhun verrattuna, mutta kuvauksen onnistuminen on edelleen varsin epätodennäköistä. Helmikuussa on vielä keskimäärin enemmän päiviä jolloin yksikään kuvaus ei onnistu kuin päiviä jolloin kuvaukset onnistuvat (taulukko 13). Sama voidaan havaita kuvan 69 esimerkkisimuloinnista. Helmikuu on Suomessa huonoa aikaa optisen alueen satelliittikuvaukselle.

Vuorokausittainen kuvausväli pysyy noin 19 tunnissa. Päivän ensimmäinen kuvausmahdollisuus on keskimäärin noin klo 10:00 ja viimeinen noin klo 16:00.

Helmikuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkkisimulointi sääolosuhteiden mahdollisesta vaikutuksesta



Kuva 69. Helmikuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi

MAALISKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

Taulukko 14. Maaliskuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

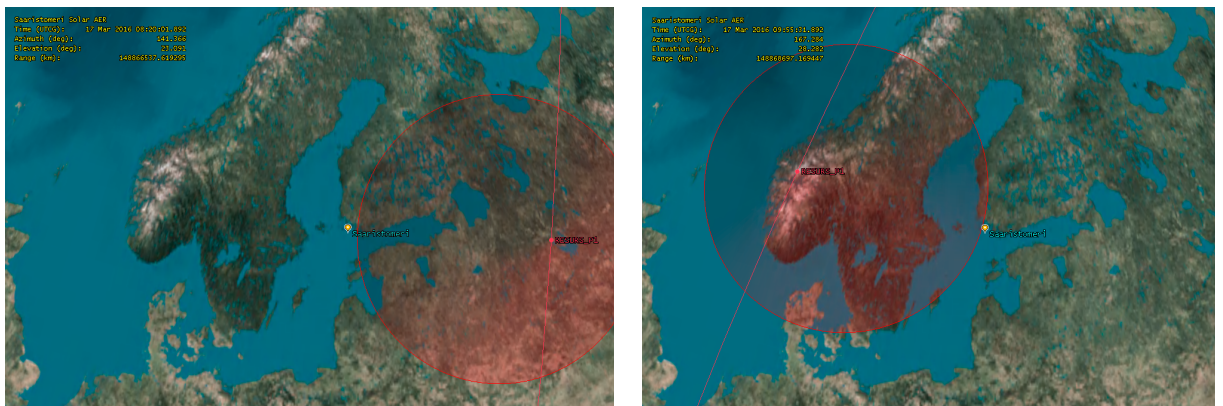
Maaliskuu 2016									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.3.2016	10	5	57 %	57 %	15 %	15 %	18,00	10:06	14:20
2.3.2016	11	5	60 %	60 %	13 %	13 %	19,00	9:16	14:21
3.3.2016	11	6	62 %	62 %	42 %	17 %	19,50	10:03	14:22
4.3.2016	12	5	64 %	64 %	36 %	15 %	19,00	9:12	14:22
5.3.2016	11	5	58 %	58 %	37 %	13 %	19,50	9:59	14:23
6.3.2016	12	5	57 %	57 %	34 %	13 %	19,00	9:09	14:24
7.3.2016	12	5	67 %	67 %	40 %	16 %	19,50	9:55	14:25
8.3.2016	12	5	66 %	66 %	42 %	16 %	18,50	9:05	14:26
9.3.2016	12	5	62 %	62 %	30 %	8 %	19,50	9:51	14:26
10.3.2016	12	5	62 %	62 %	40 %	12 %	18,50	9:02	14:27
11.3.2016	12	5	59 %	59 %	31 %	12 %	19,50	9:48	14:28
12.3.2016	11	5	68 %	68 %	43 %	17 %	20,00	10:35	14:29
13.3.2016	12	5	61 %	61 %	40 %	15 %	19,00	9:44	14:30
14.3.2016	12	5	54 %	54 %	32 %	8 %	18,50	8:55	14:31
15.3.2016	12	6	56 %	56 %	34 %	17 %	19,00	9:40	14:31
16.3.2016	11	5	64 %	64 %	38 %	15 %	20,00	10:27	14:32
17.3.2016	11	5	62 %	39 %	39 %	15 %	19,00	9:36	14:33
18.3.2016	10	5	58 %	38 %	38 %	8 %	20,00	10:23	14:34
19.3.2016	11	5	63 %	44 %	44 %	16 %	19,00	9:33	14:35
20.3.2016	11	5	64 %	64 %	37 %	13 %	19,50	10:20	14:36
21.3.2016	12	6	55 %	55 %	39 %	16 %	19,00	9:29	14:36
22.3.2016	10	5	60 %	60 %	41 %	17 %	19,50	10:16	14:37
23.3.2016	11	5	66 %	66 %	49 %	22 %	19,00	9:25	14:38
24.3.2016	10	4	66 %	66 %	35 %	12 %	19,50	10:12	14:39
25.3.2016	11	5	65 %	65 %	38 %	19 %	18,50	9:22	14:40
26.3.2016	10	5	58 %	58 %	34 %	14 %	19,50	10:08	14:41
27.3.2016	12	4	80 %	58 %	28 %	13 %	18,50	9:18	18:59
28.3.2016	9	4	57 %	57 %	10 %	0 %	15,00	10:05	14:42
29.3.2016	12	4	76 %	58 %	23 %	0 %	18,50	9:14	18:55
30.3.2016	10	4	62 %	62 %	14 %	0 %	15,00	9:54	14:44
31.3.2016	12	4	74 %	64 %	27 %	0 %	18,50	9:11	18:52

Sääolosuhteet parantuvat huomattavasti maaliskuussa (pilvisuus 74 % → 62 %) ja valon määrä lisääntyy. Myös kuvaustodennäköisyydet parantuvat merkittävästi (taulukko 14). Maaliskuussa on jo hieman todennäköisempää, että päivittäin on vähintään yksi kuvausmahdollisuus kuin se, ettei sitä olisi. Useina päivinä saattaa olla jopa viisi kuvausmahdollisuutta. Kuvan 71 esimerkkisimulaatioista nähdään tapaus, jossa noin puolina kuukauden päivistä voidaan kuvata. Näinä päivinä kuvausmahdollisuuksia on varsin monta, mutta toisaalta kuukaudessa on vielä useita päiviä jolloin kuvia ei saada lainkaan.

Vuorokausittainen kuvausväli pysyy noin 19 tunnissa ja päivittäiset kuvausmahdollisuudet ovat noin klo 09:30 ja 14:30 välisenä aikana. Satelliitit ylittävät saman alueen uudestaan kiertoradasta riippuen noin 11–12 tunnin välein. Kuun lopussa, valoisan ajan kestäessä yhä pidempään, Persona-3-satelliitti alkaa sopivan kiertoratansa takia ylittää kohdealueen myös iltaisin valoisaan aikaan (kuva 71). Aamun ylitys tapahtuu noin klo 09:00 ja illan ylitys noin klo 19:00, mikä laskee vuorokausittaisen kuvausvälin noin 15 tuntiin. Ylitysten väli on hieman

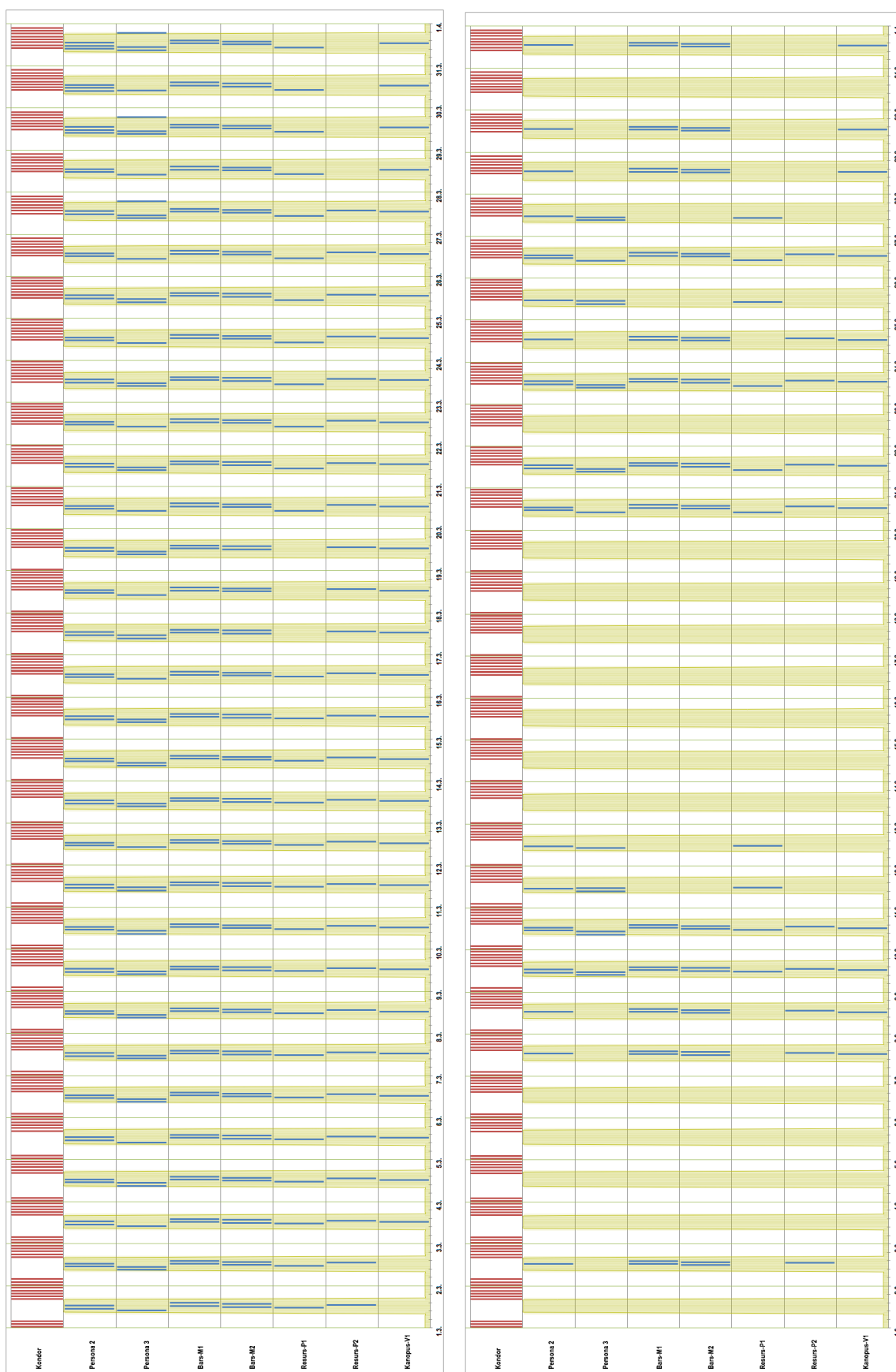
edellä mainittua 11–12 tuntia lyhyempi, koska satelliitti kykenee kuvaamaan yhden tai useamman ratakierroksen yli suuren kuvauskulmansa ansiosta.

Maaliskuussa tapahtuu myös mielenkiintoinen ilmiö, kun Resurs-P1-satelliitille ei tule kuun puolivälissä kolmeen päivään kuvausmahdollisuutta. Sama ilmiö toistuu Resurs-P2-satelliitin osalta kuun lopussa. Tämä ilmiö johtuu siitä, että kohdealue jää juuri kahden peräkkäisen ratakierroksen väliin eikä satelliittien kuvauskulma riitä kohteen kuvaamiseen tältä etäisyydeltä. Ilmiö riippuu satelliitin ratakorkeudesta ja maksimikuvauskulmasta. Tässä tutkimuksessa tehdyissä simulaatioissa sitä ei esiinny sotilassatelliiteilla, koska niiden maksimikuvauskulma on suurempi (mikä myös mahdollistaa kuvauksen kahdella peräkkäisellä ratakierroksella aiemmin esitetyllä tavalla). Kaupallisten satelliittien pienempi kuvauskulma siis estää kahdella peräkkäisellä ratakierroksella kohteen kuvaamisen sekä aiheuttaa aina kiertoradan tietyssä vaiheessa useiden päiviä tauon kuvausmahdollisuuksissa. Ilmiö on havainnollistettu kuvassa 70:



Kuva 70. Resurs-P1 -satelliitin rata ja sensorin kattama alue 17.3.2016 klo 10:20 ja 11:55

Maaliskuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkkisimulointi sääolosuhteiden mahdollisesta vaikutuksesta



Kuva 71. Maaliskuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi

HUHTIKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

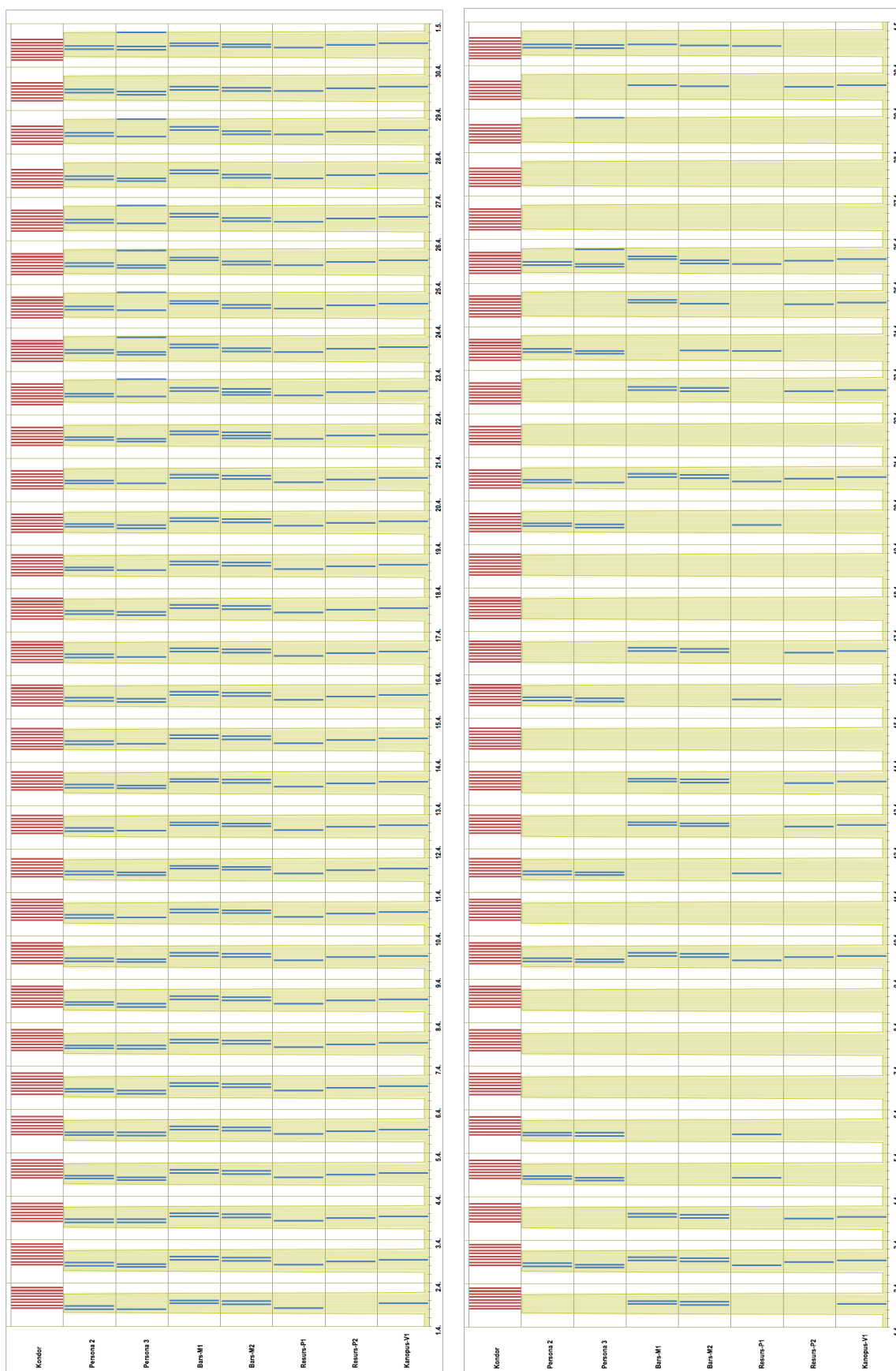
Taulukko 15. Huhtikuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

Huhtikuu 2016									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.4.2016	9	4	71 %	71 %	19 %	0 %	15,00	9:56	14:46
2.4.2016	12	5	66 %	66 %	13 %	13 %	18,50	9:07	14:47
3.4.2016	12	5	73 %	73 %	19 %	19 %	19,00	9:53	14:48
4.4.2016	12	5	71 %	71 %	16 %	16 %	18,50	9:03	14:48
5.4.2016	12	5	75 %	75 %	21 %	21 %	19,00	9:49	14:49
6.4.2016	12	5	65 %	65 %	18 %	18 %	18,00	9:00	14:50
7.4.2016	12	5	70 %	70 %	22 %	22 %	19,00	9:46	14:51
8.4.2016	12	5	69 %	69 %	21 %	21 %	18,00	8:57	14:52
9.4.2016	12	5	68 %	68 %	23 %	23 %	19,00	9:42	14:53
10.4.2016	11	5	71 %	71 %	22 %	22 %	19,00	10:02	14:54
11.4.2016	12	5	78 %	78 %	22 %	22 %	18,50	9:38	14:55
12.4.2016	11	5	70 %	70 %	10 %	10 %	19,00	10:04	14:55
13.4.2016	12	5	58 %	58 %	19 %	19 %	18,50	9:34	14:56
14.4.2016	11	5	69 %	69 %	19 %	19 %	19,00	10:05	14:57
15.4.2016	12	5	70 %	70 %	21 %	21 %	18,50	9:31	14:58
16.4.2016	11	5	75 %	75 %	18 %	18 %	19,00	10:07	14:59
17.4.2016	12	5	76 %	76 %	25 %	25 %	18,50	9:27	15:00
18.4.2016	11	5	82 %	82 %	14 %	14 %	19,00	10:08	15:01
19.4.2016	12	5	75 %	75 %	25 %	25 %	18,50	9:23	15:02
20.4.2016	11	5	60 %	60 %	12 %	12 %	19,00	10:10	15:03
21.4.2016	13	5	65 %	65 %	37 %	16 %	18,50	9:20	15:04
22.4.2016	13	4	85 %	66 %	48 %	12 %	19,00	10:06	19:46
23.4.2016	13	5	82 %	71 %	51 %	21 %	13,50	9:16	18:57
24.4.2016	12	5	87 %	75 %	52 %	20 %	15,00	10:02	19:42
25.4.2016	13	5	91 %	84 %	62 %	24 %	13,50	9:12	18:53
26.4.2016	12	4	87 %	71 %	44 %	13 %	15,00	9:59	19:38
27.4.2016	12	5	70 %	70 %	38 %	22 %	13,50	9:09	15:09
28.4.2016	12	5	87 %	75 %	53 %	16 %	19,00	9:55	19:35
29.4.2016	12	5	75 %	75 %	33 %	10 %	13,50	9:05	13:27
30.4.2016	13	6	80 %	73 %	54 %	24 %	20,50	9:51	19:31

Myös huhtikuussa sääolosuhteet parantuvat (pilvisuus 62 % → 51 %) ja valon määrä lisääntyy. Tämä havaitaan kuvaustodennäköisyyksien lisääntymisellä taulukosta 15. Kuun aikana on jo suuri todennäköisyys useammalle kuin kolmelle kuvaukselle vuorokaudessa. Etenkin loppukuusta myös yli viiden kuvauskerran päiviä tulee enemmän. Kuva 72 havainnollistaa, miten ajanjaksolle osuu todennäköisesti myös pilvisiäkin päiviä.

Vuorokausittainen kuvausväli pysyttelee noin 18–20 tunnin välillä. Muutamia poikkeuspäiviäkin on, kun Persona-3-satelliitin kiertorata mahdollistaa kuvauksen myös illalla ennen pimeätä. Tällöin kuvausväli laskee noin 14–15 tunnin välille. Vuorokauden ensimmäinen kuvausmahdollisuus on keskimäärin noin klo 09:00 ja viimeinen noin klo 15:00. Toisenlaisilla kiertoradoilla iltapäivän valoisa aika kyettäisiin käyttämään vielä tehokkaammin kuvaukseen.

Huhtikuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkksimulointi sääolosuhteiden mahdollisista vaikutuksista



Kuva 72. Huhtikuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkksimulointi

TOUKOKUUN KUVausMAHDOLLISUUDET

Taulukko 16. Toukokuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

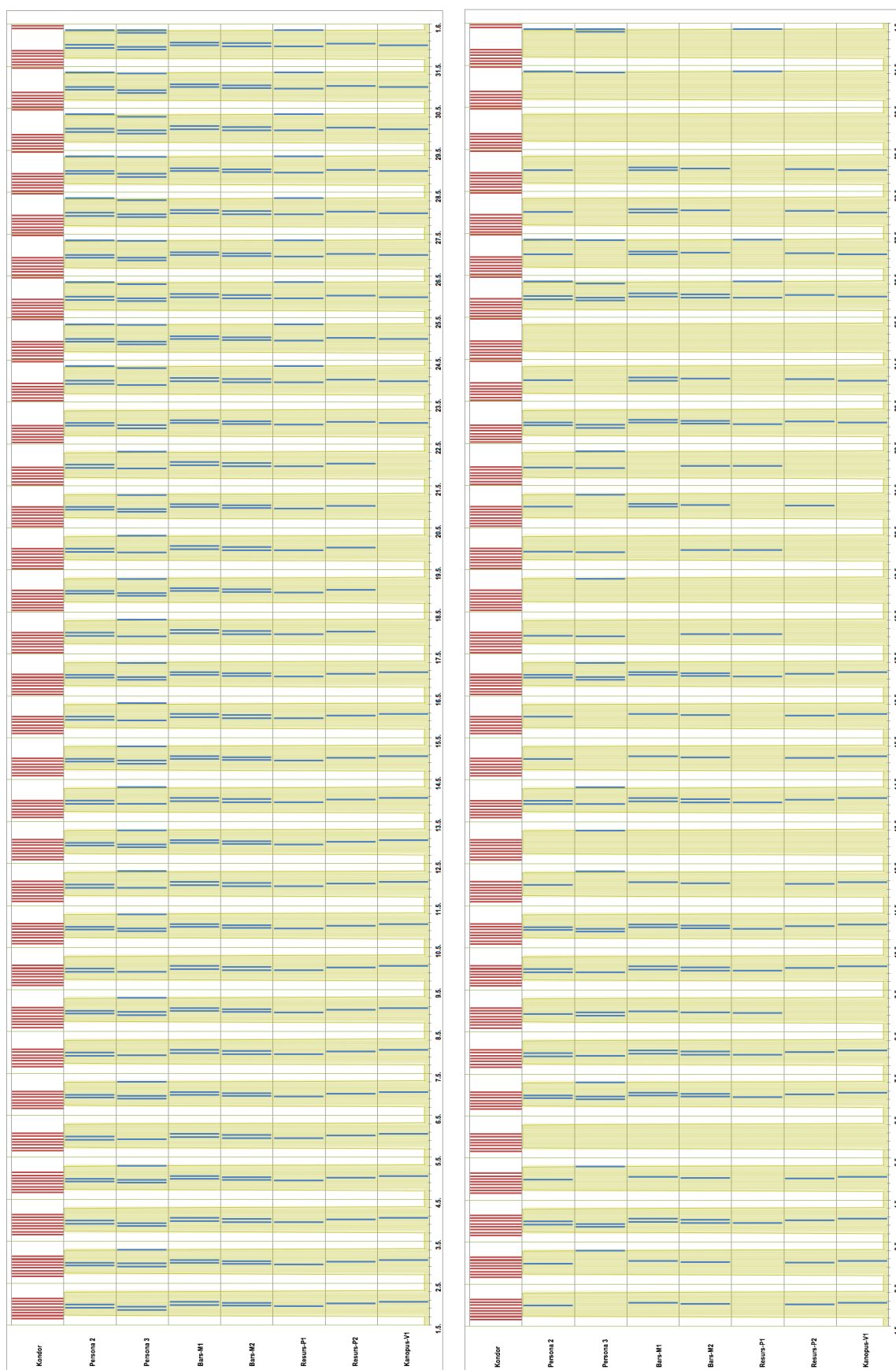
Toukokuu 2015									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.5.2016	12	7	85 %	85 %	85 %	33 %	13,50	9:01	13:29
2.5.2016	12	6	89 %	83 %	83 %	33 %	20,50	9:47	19:27
3.5.2016	11	6	78 %	78 %	78 %	30 %	13,50	8:58	13:30
4.5.2016	12	5	96 %	83 %	83 %	36 %	20,00	9:44	19:24
5.5.2016	10	6	89 %	89 %	89 %	41 %	15,00	10:21	13:32
6.5.2016	12	5	99 %	88 %	88 %	36 %	20,00	9:40	19:20
7.5.2016	10	6	89 %	89 %	89 %	40 %	15,00	10:23	13:34
8.5.2016	12	6	91 %	83 %	83 %	38 %	20,00	9:36	19:16
9.5.2016	11	7	82 %	82 %	82 %	36 %	15,00	10:23	13:35
10.5.2016	13	6	97 %	90 %	90 %	28 %	20,00	9:32	19:13
11.5.2016	12	7	94 %	88 %	88 %	44 %	15,00	10:19	19:59
12.5.2016	13	6	93 %	79 %	79 %	28 %	13,50	9:29	19:09
13.5.2016	12	6	95 %	81 %	81 %	23 %	15,00	10:15	19:55
14.5.2016	13	6	93 %	80 %	80 %	30 %	13,50	9:25	19:05
15.5.2016	12	7	89 %	83 %	83 %	45 %	15,00	10:12	19:51
16.5.2016	13	6	92 %	85 %	85 %	32 %	13,50	9:21	19:02
17.5.2016	11	5	93 %	81 %	73 %	37 %	15,00	10:08	19:47
18.5.2016	12	5	92 %	75 %	71 %	31 %	13,50	9:17	18:58
19.5.2016	11	5	88 %	80 %	75 %	38 %	15,00	10:04	19:44
20.5.2016	12	5	95 %	87 %	73 %	31 %	13,50	9:14	18:55
21.5.2016	11	5	94 %	84 %	78 %	44 %	15,00	10:00	19:40
22.5.2016	12	6	87 %	87 %	87 %	36 %	13,50	9:10	13:45
23.5.2016	14	6	94 %	94 %	85 %	57 %	20,00	9:56	20:40
24.5.2016	15	6	95 %	95 %	79 %	53 %	12,50	9:06	20:41
25.5.2016	15	6	94 %	94 %	80 %	45 %	13,00	9:53	20:42
26.5.2016	15	6	92 %	92 %	83 %	53 %	12,50	9:03	20:43
27.5.2016	15	6	89 %	89 %	84 %	49 %	13,00	9:49	20:43
28.5.2016	15	6	94 %	94 %	87 %	41 %	12,50	8:59	20:44
29.5.2016	15	6	92 %	92 %	88 %	45 %	13,00	9:45	20:45
30.5.2016	15	6	93 %	93 %	79 %	53 %	12,00	8:56	20:46
31.5.2016	16	6	90 %	90 %	77 %	51 %	13,00	9:41	20:59

Toukokuussa sääolosuhteet parantuvat edelleen (pilvisuus 51% → 41%) ja valonmäärä lisääntyy. Tämä havaitaan myös selkeästi kuvaustodennäköisyyksien lisääntymisellä taulukosta 16. Kuvausmahdollisuuksia on käytännössä päivittäin useimmiten ainakin viisi ja lähes joka toinen päivä seitsemän tai enemmän. Kuvan 73 esimerkksimuloinnista havaitaan myös muutama kokonaan pilvinen päivä, joita saattaa sattua ajanjaksolle.

Kuun alkupuolella vuorokausittainen kuvausväli vaihtelee suuresti 14 ja 20 tunnin välillä. Tämä johtuu siitä, että joinakin päivinä Persona-2 ylittää alueen valoisaan aikaan aamuin ja illoin, kun taas joinakin päivinä vain aamuisin. Kuun puolestavälistä eteenpäin kuvausväli kuitenkin vakiintuu noin 13–15 tunnin välillä. Päivittäiset kuvausmahdollisuudet ovat klo 09:00 ja 20:00 välissä, loppukuusta jopa vielä hieman myöhemmin. Kuun lopussa Persona-2 ja Resurs-P1 alkavat ylittää alueen iltaisin valoisaan aikaan, jolloin kuvauksia tapahtuu säännöllisesti koko päivän ajan.

Tällä kertaa Kanopus-V1 –satelliitin kiertorata tulee kuun puolivälin jälkeen vaiheeseen, jossa kuvausmahdollisuuksia ei ole muutamaan päivään (kuva 73).

Toukokuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkkisimulointi sääolosuhteiden mahdollisesta vaikutuksesta



Kuva 73. Toukokuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi

KESÄKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

Taulukko 17. Kesäkuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

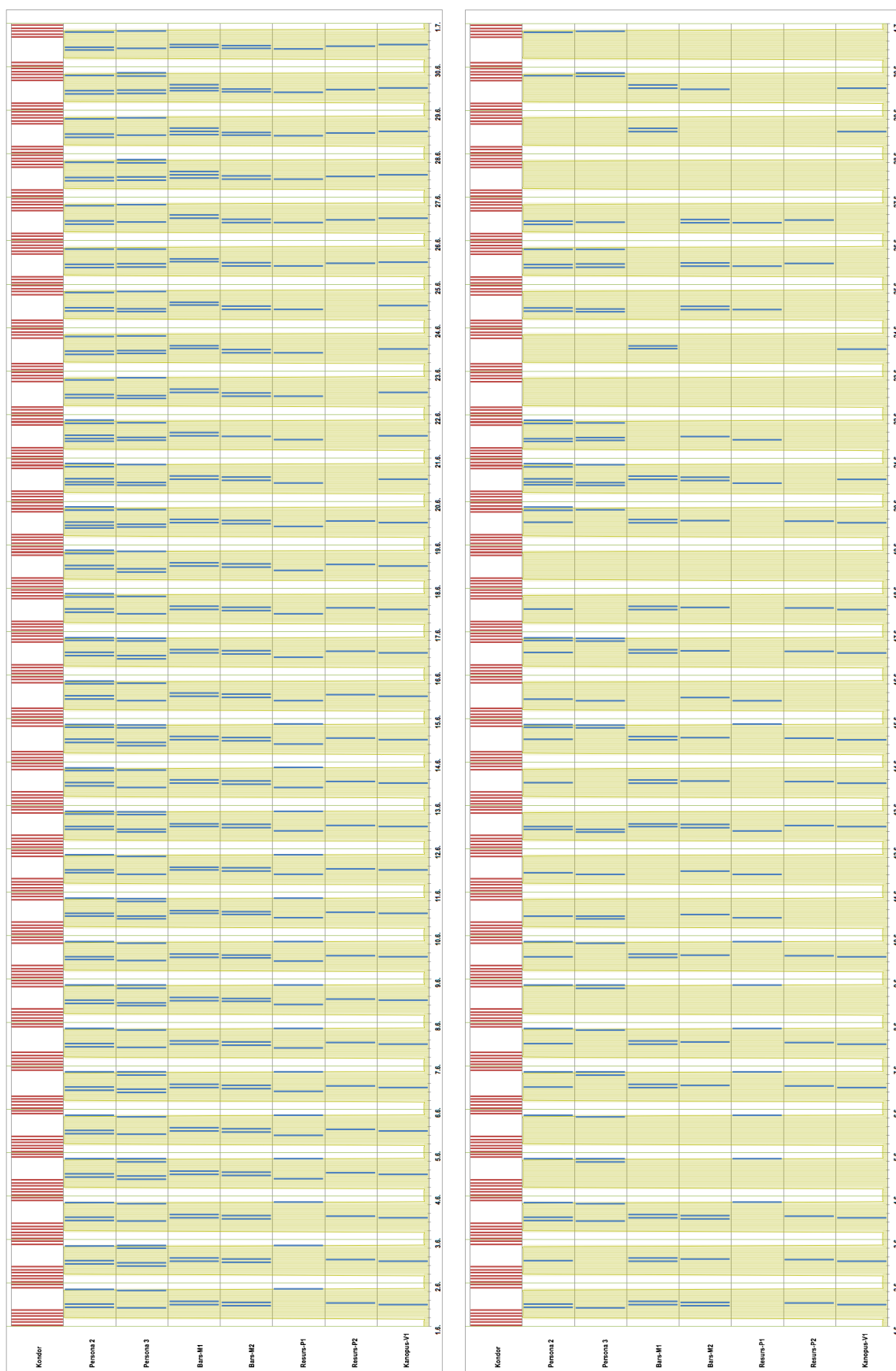
Kesäkuu 2016									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.6.2016	12	5	90 %	90 %	52 %	28 %	13,50	10:28	20:48
2.6.2016	14	5	87 %	87 %	46 %	30 %	13,00	9:38	20:55
3.6.2016	12	5	91 %	91 %	56 %	31 %	13,50	10:25	20:50
4.6.2016	15	5	90 %	90 %	47 %	37 %	12,50	9:34	20:51
5.6.2016	13	6	92 %	92 %	57 %	47 %	13,00	9:56	20:51
6.6.2016	15	5	87 %	87 %	54 %	40 %	12,50	9:30	20:52
7.6.2016	14	6	93 %	93 %	82 %	46 %	13,00	9:57	20:53
8.6.2016	16	6	88 %	88 %	81 %	36 %	12,50	9:26	20:54
9.6.2016	14	6	91 %	91 %	77 %	38 %	13,00	9:59	20:55
10.6.2016	16	6	95 %	95 %	82 %	51 %	12,50	9:23	20:56
11.6.2016	14	6	91 %	91 %	81 %	42 %	13,00	10:01	20:57
12.6.2016	17	6	93 %	93 %	79 %	41 %	12,50	9:19	20:58
13.6.2016	15	6	85 %	85 %	73 %	42 %	13,00	10:03	20:59
14.6.2016	17	6	95 %	95 %	80 %	45 %	12,50	9:15	20:59
15.6.2016	14	6	85 %	77 %	77 %	37 %	13,00	10:02	20:54
16.6.2016	16	6	88 %	76 %	76 %	29 %	12,50	9:11	20:55
17.6.2016	14	5	91 %	76 %	76 %	23 %	13,00	9:58	20:56
18.6.2016	15	6	87 %	74 %	74 %	28 %	12,00	9:08	20:56
19.6.2016	16	5	89 %	73 %	73 %	25 %	12,50	9:17	20:57
20.6.2016	15	5	88 %	80 %	75 %	25 %	12,00	9:04	20:58
21.6.2016	14	5	85 %	75 %	49 %	26 %	12,50	9:18	20:59
22.6.2016	13	5	93 %	64 %	53 %	29 %	12,00	9:00	20:17
23.6.2016	13	5	90 %	63 %	51 %	31 %	13,00	9:20	19:26
24.6.2016	13	5	84 %	56 %	45 %	31 %	13,50	8:57	20:13
25.6.2016	14	5	89 %	66 %	55 %	33 %	13,00	9:21	19:23
26.6.2016	13	6	97 %	80 %	68 %	34 %	14,00	9:22	20:09
27.6.2016	15	5	91 %	69 %	54 %	31 %	13,00	9:22	20:57
28.6.2016	13	5	92 %	65 %	52 %	29 %	12,50	9:23	20:05
29.6.2016	15	5	94 %	79 %	65 %	27 %	13,50	9:24	20:53
30.6.2016	12	5	94 %	79 %	69 %	29 %	12,50	9:24	20:01

Vaikka kesäkuussa valon määrä on toukokuuta suurempi, niin taulukoista 16 ja 17 nähdään, että kohdealueella toukokuu on kuvauksen kannalta parempi kuukausi. Tämä johtuu siitä, että tilastollisesti Saaristomerellä kesäkuu on toukokuuta pilvisempi (41 % → 46 %). Vähintään kolmea päivittäistä kuvausta voidaan pitää erittäin todennäköisenä, useimpina päivinä päästään myös viiteen tai useampaan kuvauskertaan. Kuvan 74 esimerkkisimuloinnista kuitenkin nähdään, että kesäkuussa voi olla myös useita kokonaan pilvisiä päiviä.

Kesäpäivänseisauksen aikaan jolloin päivä on pisimmillään, Persona 2 kykenee jopa viiteen vuorokausittaiseen kuvauskertaan (kuva 74). Persona-1- ja -2 sekä Resurs-P1-satelliitit ylittävät kohdealueen edelleen aamuisin ja iltaisin, jolloin päivittäiset kuvausmahdollisuudet ovat välillä klo 09:00–21:00. Vuorokausittainen kuvausväli pysyy noin 12–13 tunnin välillä. Kuvauksia tapahtuu säännöllisesti koko päivän ajan eli valoisa aika käytetään tehokkaasti.

Resurs-P2-satelliitin kiertorata tulee kuun puolivälin jälkeen taas vaiheeseen, jossa kuvausmahdollisuuksia ei ole muutamaan päivään (kuva 74).

Kesäkuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkksimulointi sääolosuhteiden mahdollisista vaikutuksista



Kuva 74. Kesäkuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkksimulointi

HEINÄKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

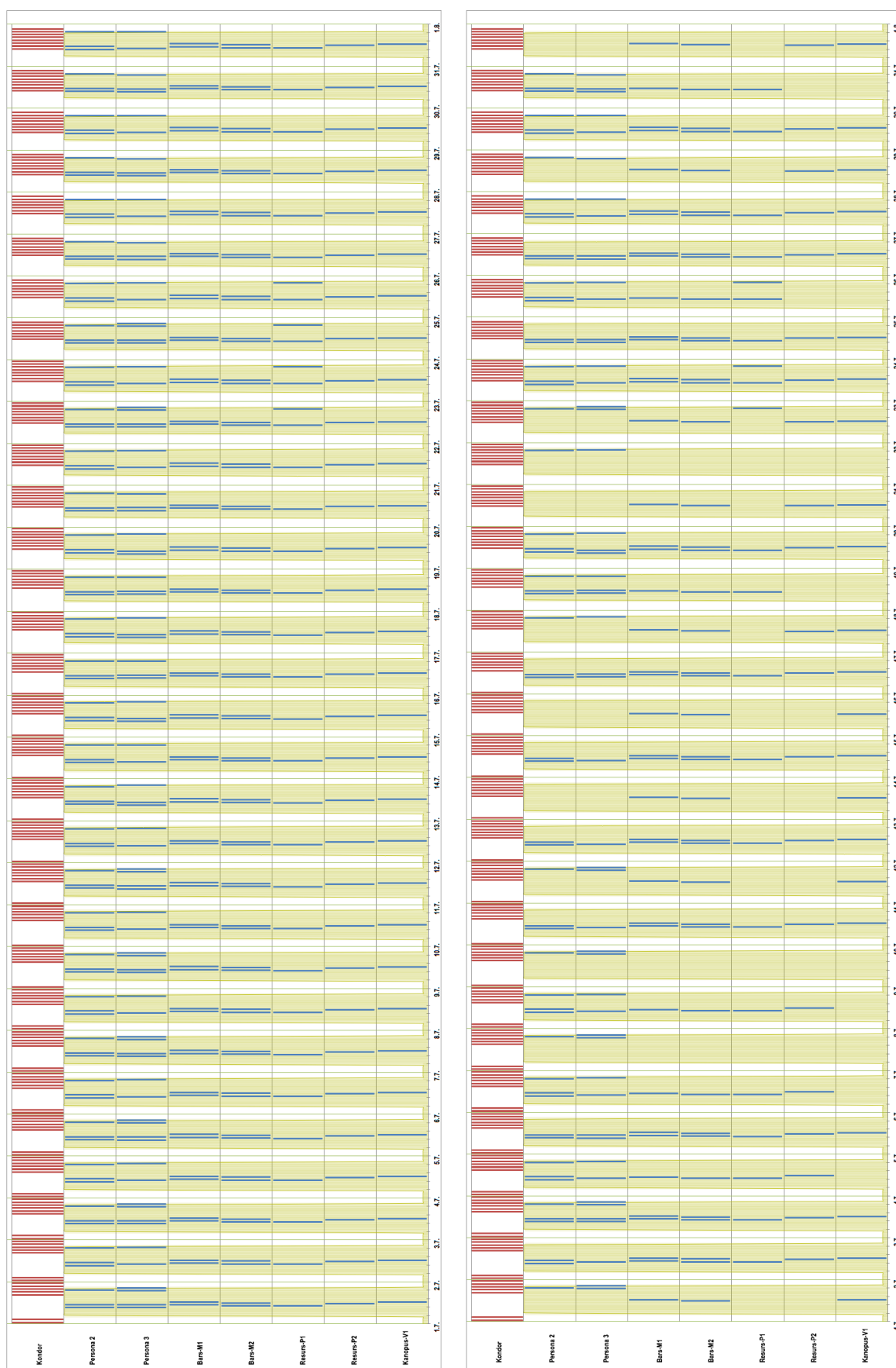
Taulukko 18. Heinäkuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

Heinäkuu 2016									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.7.2016	14	6	96 %	89 %	79 %	41 %	13,50	9:25	20:49
2.7.2016	13	6	93 %	85 %	77 %	63 %	12,50	9:26	19:58
3.7.2016	15	6	90 %	77 %	65 %	56 %	13,50	9:27	20:45
4.7.2016	13	6	93 %	80 %	67 %	52 %	12,50	9:27	19:54
5.7.2016	15	6	88 %	83 %	74 %	58 %	13,50	9:24	20:41
6.7.2016	13	6	91 %	85 %	74 %	64 %	13,00	9:29	19:50
7.7.2016	15	6	95 %	84 %	75 %	58 %	13,50	9:20	20:37
8.7.2016	13	6	92 %	84 %	70 %	53 %	13,00	9:30	19:46
9.7.2016	15	6	92 %	78 %	65 %	56 %	13,50	9:16	20:33
10.7.2016	13	6	93 %	83 %	74 %	59 %	13,00	9:32	19:43
11.7.2016	15	6	96 %	86 %	80 %	61 %	13,50	9:13	20:30
12.7.2016	13	6	93 %	80 %	70 %	56 %	13,00	9:33	19:39
13.7.2016	14	7	87 %	84 %	79 %	63 %	13,50	9:09	20:26
14.7.2016	13	6	95 %	88 %	83 %	68 %	13,00	9:35	19:36
15.7.2016	14	6	93 %	84 %	68 %	58 %	13,50	9:05	20:22
16.7.2016	14	6	91 %	81 %	71 %	56 %	13,00	9:36	19:38
17.7.2016	14	6	98 %	89 %	80 %	33 %	13,50	9:02	20:18
18.7.2016	14	6	93 %	78 %	71 %	36 %	13,50	9:38	19:39
19.7.2016	13	6	94 %	85 %	80 %	40 %	13,50	8:58	20:14
20.7.2016	13	5	93 %	82 %	64 %	30 %	13,50	9:39	19:41
21.7.2016	12	5	93 %	80 %	66 %	30 %	14,00	9:40	20:10
22.7.2016	15	6	91 %	91 %	74 %	50 %	13,50	9:40	20:58
23.7.2016	14	6	93 %	93 %	67 %	49 %	12,50	9:42	20:07
24.7.2016	16	7	93 %	93 %	78 %	56 %	13,50	9:37	20:54
25.7.2016	14	6	95 %	95 %	72 %	50 %	13,00	9:43	20:03
26.7.2016	14	6	94 %	86 %	74 %	30 %	13,50	9:33	19:45
27.7.2016	13	6	95 %	84 %	74 %	28 %	14,00	9:45	19:59
28.7.2016	14	6	91 %	82 %	76 %	32 %	13,50	9:29	19:47
29.7.2016	13	6	94 %	83 %	66 %	30 %	14,00	9:46	19:55
30.7.2016	14	6	91 %	80 %	66 %	34 %	13,50	9:25	19:48
31.7.2016	13	6	91 %	79 %	68 %	36 %	14,00	9:48	19:51

Heinäkuu on erittäin hyvää kuvausaikaa. Taulukosta 18 nähdään, miten lähes päivittäin alueelta saada yli viisi onnistunutta kuvausta – useina päivinä jopa seitsemän tai enemmän onnistunutta kuvasta. Kuvan 75 esimerkisimuloinnista voidaan myös havaita se, ettei kyseisellä simulointikierröksellä kuukauteen sattunut yhtään päivää, jolloin kuvaus ei onnistuisi.

Koska Persona-1- ja Persona-2-satelliitit ylittävät kohdealueen edelleen aamuisin ja iltaisin valoisaan aikaan, ovat päivittäiset kuvausmahdollisuudet noin klo 09:30 ja 20:30 välillä, eli vuorokausittainen kuvausväli pysyy noin 13–14 tunnin välillä. Kuvauksia tapahtuu säännöllisesti koko päivän ajan eli valoisuus käytetään tehokkaasti hyväksi.

Heinäkuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkksisimulointi sääolosuhteiden mahdollisista vaikutuksesta



Kuva 75. Heinäkuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkksisimulointi

ELOKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

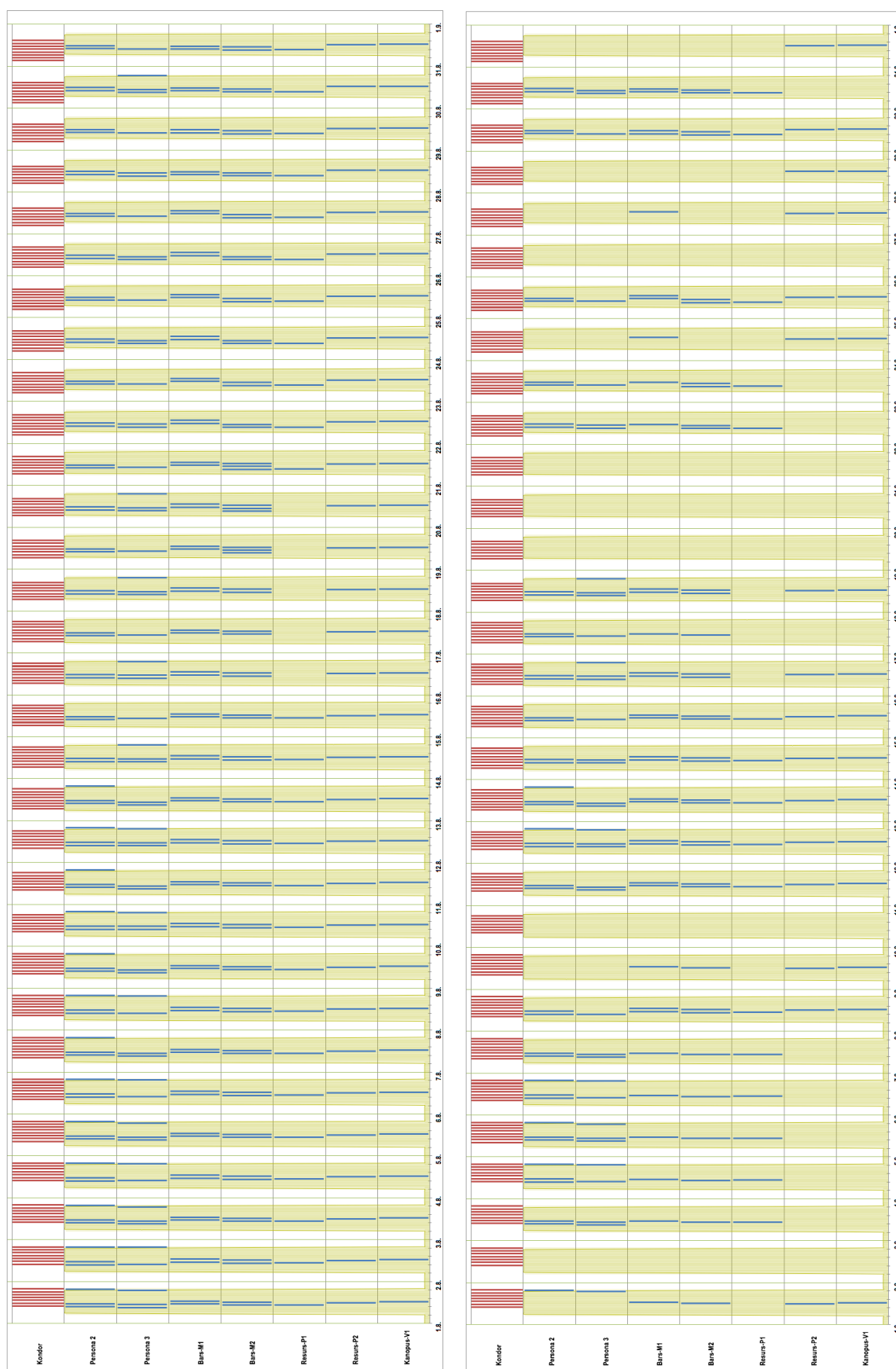
Taulukko 19. Elokuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

Elokuu 2016									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.8.2016	14	6	91 %	77 %	62 %	29 %	13,50	9:21	19:50
2.8.2016	13	6	95 %	87 %	74 %	28 %	14,00	9:49	19:51
3.8.2016	14	6	89 %	78 %	66 %	26 %	13,50	9:18	19:51
4.8.2016	13	6	86 %	76 %	68 %	36 %	14,00	9:51	19:52
5.8.2016	14	6	91 %	80 %	71 %	27 %	13,50	9:14	19:53
6.8.2016	13	6	93 %	79 %	63 %	26 %	14,00	9:52	19:54
7.8.2016	13	5	89 %	75 %	67 %	27 %	13,50	9:10	19:54
8.8.2016	12	5	87 %	75 %	61 %	28 %	14,00	9:54	19:55
9.8.2016	12	5	91 %	79 %	71 %	24 %	13,00	9:07	19:56
10.8.2016	13	5	88 %	77 %	65 %	30 %	14,00	9:53	19:57
11.8.2016	12	5	81 %	73 %	65 %	25 %	13,00	9:03	19:57
12.8.2016	14	6	92 %	75 %	65 %	30 %	14,00	9:49	19:58
13.8.2016	13	6	86 %	77 %	67 %	31 %	13,00	8:59	19:59
14.8.2016	13	6	94 %	81 %	75 %	38 %	14,00	9:45	19:25
15.8.2016	11	6	78 %	78 %	59 %	31 %	14,50	9:59	13:13
16.8.2016	12	5	92 %	81 %	69 %	28 %	20,50	9:41	19:21
17.8.2016	10	5	82 %	82 %	51 %	22 %	14,50	10:01	13:15
18.8.2016	12	5	92 %	81 %	73 %	28 %	20,50	9:38	19:18
19.8.2016	11	6	83 %	83 %	56 %	36 %	14,00	9:21	13:16
20.8.2016	13	5	89 %	78 %	62 %	27 %	20,00	9:22	19:14
21.8.2016	12	6	79 %	79 %	55 %	25 %	14,00	9:23	13:18
22.8.2016	12	6	77 %	77 %	55 %	32 %	20,00	9:23	13:19
23.8.2016	11	6	81 %	81 %	52 %	25 %	20,00	9:24	13:20
24.8.2016	12	6	69 %	69 %	50 %	29 %	20,00	9:25	13:21
25.8.2016	11	6	86 %	86 %	57 %	30 %	20,00	9:25	13:22
26.8.2016	12	5	73 %	73 %	45 %	18 %	20,00	9:23	13:23
27.8.2016	10	5	78 %	78 %	48 %	24 %	20,00	9:27	13:24
28.8.2016	11	5	76 %	53 %	53 %	25 %	20,00	9:19	12:44
29.8.2016	10	5	84 %	54 %	54 %	35 %	20,50	9:28	12:44
30.8.2016	12	4	85 %	63 %	49 %	25 %	20,50	9:15	18:56
31.8.2016	11	5	80 %	51 %	51 %	25 %	14,50	9:30	12:45

Elokuu on vielä varsin hyvää kuvausaikaa. Taulukosta 19 nähdään, että lähes koko kuukauden ajan kohdealueelta saadaan päivittäin vähintään 3 kuvaa ja useina päivinä yli 5 kuvaa. Yli 7 kuvauskerran päivät alkavat kuitenkin käydä jo harvinaisiksi. Kuvan 76 esimerkksimuloinnista nähdään kuitenkin se, että myös useamman päivän peräkkäisiä pilvijaksoa esiintyä elokuussa. Kuvasta voidaan myös havaita jälleen kuun puolivälissä oleva jakso, jolloin Resurs-P1 ei kykene kuvaamaan kohdealuetta. Syy tähän on esitetty aiemmin.

Kuukauden loppupuolelle saakka päivittäiset kuvausmahdollisuudet heinäkuun tapaan noin klo 09:00 ja 20:00 välillä, jolloin myös vuorokausittainen kuvausväli pysyy vielä noin 13–14 tunnissa. Kuun lopussa valon määrän vähentymisen takia kuitenkin sekä Persona-2- että Persona-3-satelliittien toinen vuorokausittainen ylitys tapahtuu pimeään aikaan, jolloin myös vuorokausittainen kuvausväli kasvaa noin 20 tuntiin. Pääsääntöisesti satelliitit käyttävät kuitenkin koko valoisan ajan varsin tehokkaasti. Kuun lopulla huomataan myös kuvaustodennäköisyyksien selkeä lasku.

Elokuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkkisimulointi sääolosuhteiden mahdollisista vaikutuksista



Kuva 76. Elokuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkkisimulointi

SYYSKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

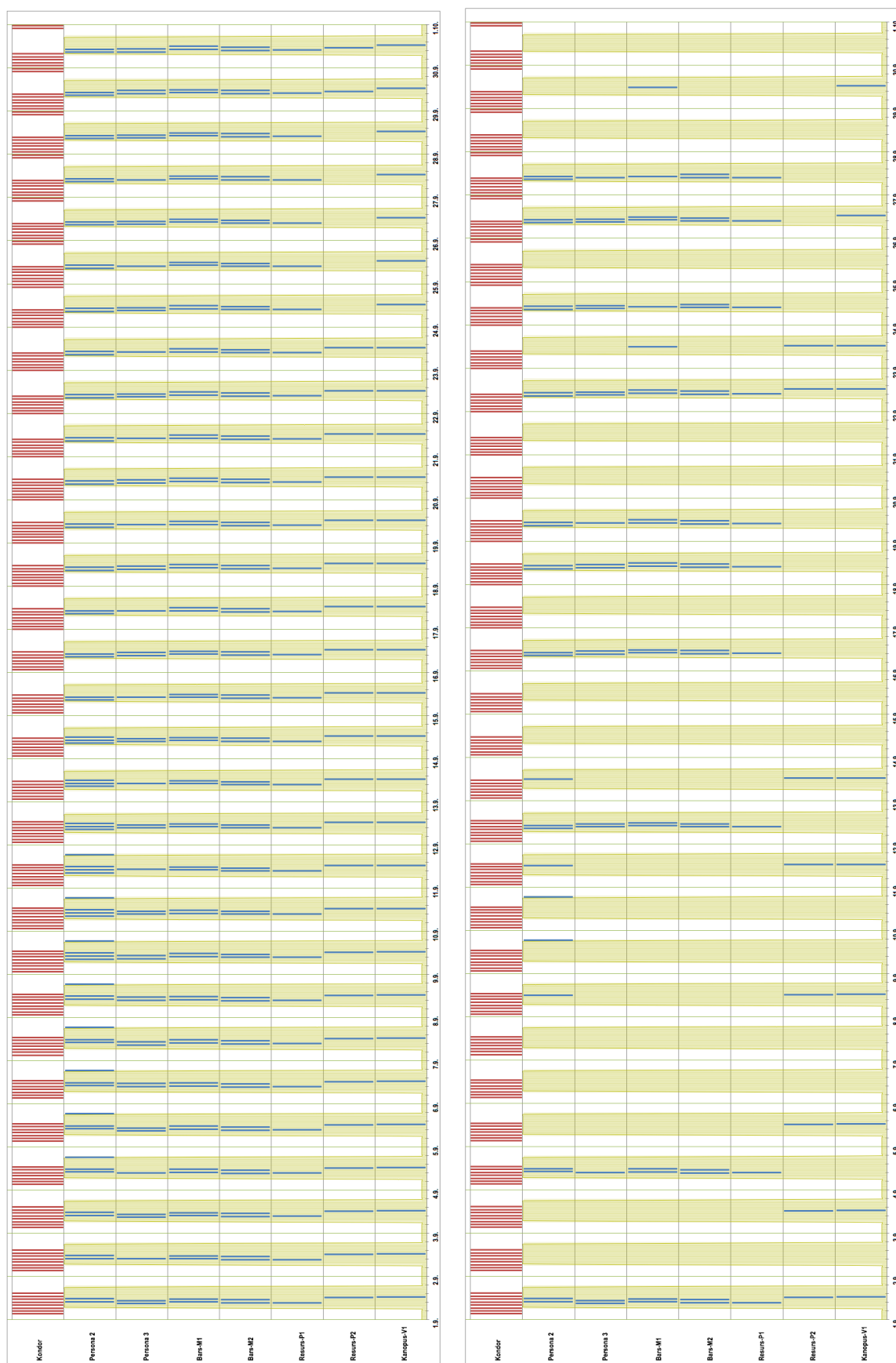
Taulukko 20. Syyskuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

Syyskuu 2016									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.9.2016	12	5	59 %	38 %	38 %	9 %	20,50	9:11	12:45
2.9.2016	11	5	51 %	32 %	32 %	12 %	21,00	9:31	12:45
3.9.2016	12	4	60 %	31 %	31 %	12 %	20,50	9:08	12:45
4.9.2016	12	4	77 %	46 %	38 %	15 %	21,00	9:33	18:38
5.9.2016	13	4	75 %	41 %	31 %	8 %	14,50	9:04	18:38
6.9.2016	13	4	62 %	47 %	29 %	9 %	15,00	9:34	18:39
7.9.2016	13	4	70 %	57 %	34 %	11 %	14,50	9:00	18:40
8.9.2016	13	4	64 %	50 %	27 %	10 %	15,00	9:36	18:40
9.9.2016	14	5	66 %	53 %	35 %	12 %	14,00	8:40	18:41
10.9.2016	14	5	80 %	66 %	41 %	16 %	14,00	8:40	18:42
11.9.2016	13	4	78 %	60 %	39 %	15 %	14,00	8:41	18:42
12.9.2016	13	5	55 %	55 %	30 %	14 %	14,00	8:41	12:45
13.9.2016	11	5	55 %	55 %	33 %	11 %	20,00	8:42	12:45
14.9.2016	12	5	54 %	54 %	35 %	9 %	20,00	8:43	12:45
15.9.2016	10	5	59 %	40 %	40 %	15 %	20,00	8:43	12:45
16.9.2016	11	4	58 %	32 %	32 %	15 %	20,00	8:44	12:45
17.9.2016	11	5	62 %	36 %	36 %	12 %	20,00	8:45	12:45
18.9.2016	12	5	62 %	39 %	39 %	17 %	20,00	8:45	12:45
19.9.2016	11	5	55 %	37 %	37 %	9 %	20,00	8:46	12:45
20.9.2016	12	5	62 %	45 %	45 %	14 %	20,00	8:47	12:45
21.9.2016	11	5	48 %	33 %	33 %	16 %	20,00	8:47	12:45
22.9.2016	12	5	45 %	45 %	28 %	11 %	20,00	8:48	12:45
23.9.2016	11	6	50 %	50 %	34 %	17 %	20,00	8:49	12:45
24.9.2016	11	4	61 %	34 %	34 %	10 %	20,00	8:50	12:45
25.9.2016	10	5	57 %	40 %	40 %	15 %	20,00	8:50	12:45
26.9.2016	11	4	60 %	31 %	31 %	8 %	20,00	8:51	12:45
27.9.2016	10	4	57 %	33 %	33 %	8 %	20,00	8:52	12:45
28.9.2016	11	4	55 %	31 %	31 %	10 %	20,00	8:53	12:45
29.9.2016	12	5	56 %	32 %	32 %	32 %	20,00	8:53	12:45
30.9.2016	11	5	60 %	37 %	37 %	17 %	20,00	8:54	12:45

Taulukosta 20 voidaan havaita, että elokuuhun verrattuna syyskuussa päivittäisten kuvausten onnistumisen todennäköisyys laskee selkeästi. Tämä on suurimmaksi osaksi seurasta sääolo-suhteiden selkeästä heikentymisestä (pilvisuus 46 % → 65 %). Syyskuussakin kuvaus onnistuu keskimäärin vielä vähintään kerran päivässä, mutta kuussa on myös jo useita päiviä, jolloin kuvaukset eivät onnistu lainkaan sään takia. Yli seitsemän kuvauskerran vuorokaudet ovat hyvin epätodennäköisiä, mutta yli viiden kuvauskerran päiviä on vielä muutaman päivän välein.

Vuorokausittain kuvausväli laskee hetkellisesti kuun aikana takaisin noin 14 tuntiin, kun Persona-2 (kuva 77) kykenee hetkellisesti kolmeen vuorokausittaiseen kuvauskertaa, joista viimeinen on vain vähän ennen kuin tulee liian pimeätä kuvaukseen. Keskimäärin päivittäiset kuvausmahdollisuudet ovat klo 09:00–13:00 välillä, mutta muutamina päivinä Persona-2 kykenee ottamaan vuorokauden viimeisen kuvan noin klo 18:30. Nykyiset kiertoradat soveltuvat kohdealueen kuvaamiseen varsin huonosti syyskuussa, iltapäivällä jää mahdollista kuvausai-kaa käyttämättä noin 5–6 tuntia. Tämä mahdollistaisi toisenlaisilla kiertoradoilla huomatta-vasti suuremman kuvausmäärän.

Syyskuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkksimulointi sääolosuhteiden mahdollisista vaikutuksesta



Kuva 77. Syyskuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkksimulointi

LOKAKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

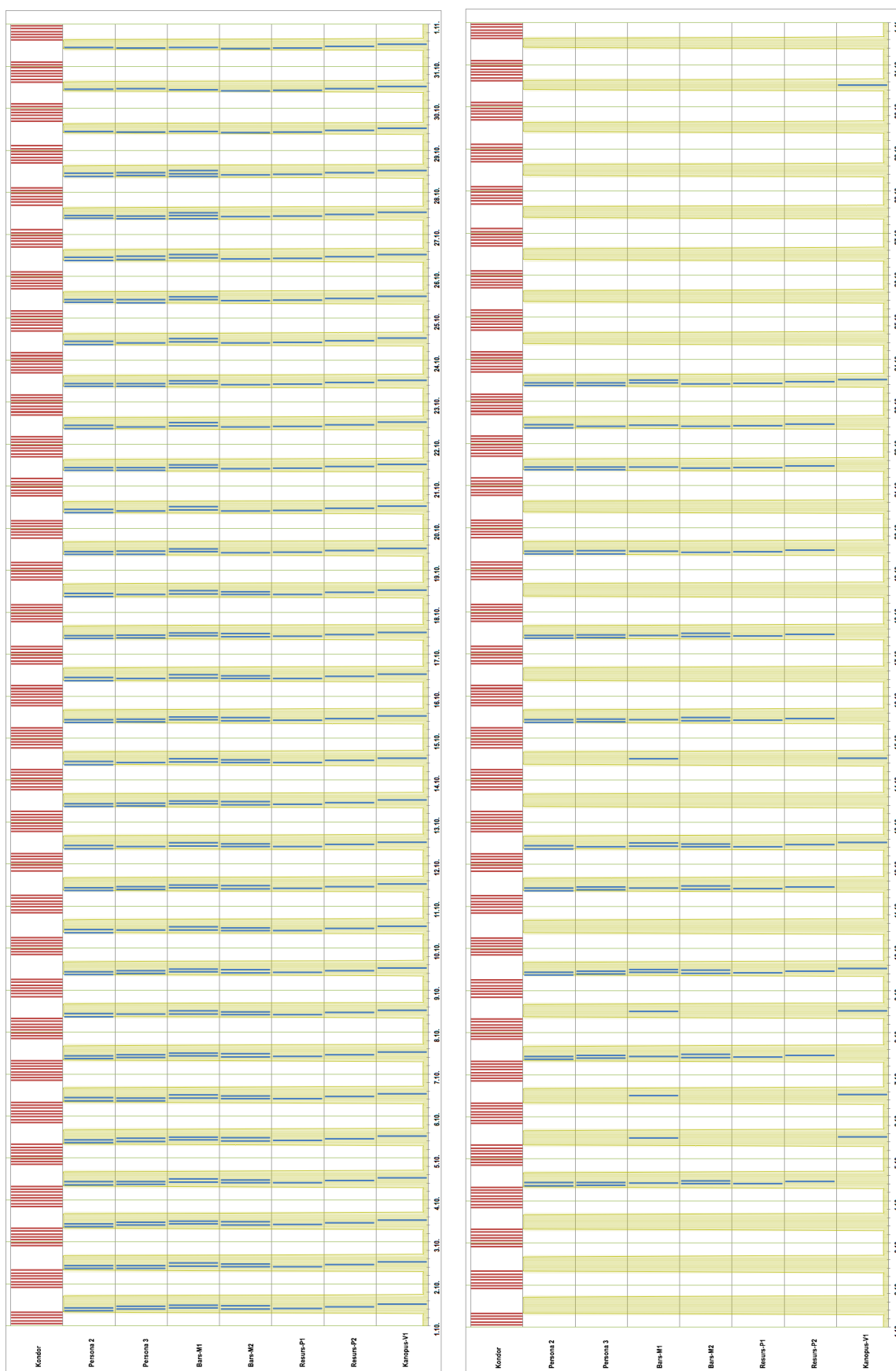
Taulukko 21. Lokakuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

Lokakuu 2016									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.10.2016	11	5	53 %	35 %	35 %	12 %	20,00	8:55	12:45
2.10.2016	11	4	61 %	35 %	35 %	10 %	20,00	8:56	12:45
3.10.2016	12	5	51 %	29 %	29 %	29 %	20,00	8:56	12:45
4.10.2016	12	5	50 %	31 %	31 %	31 %	20,00	8:57	12:45
5.10.2016	12	6	59 %	39 %	39 %	39 %	20,00	8:58	12:44
6.10.2016	12	5	44 %	27 %	27 %	27 %	20,00	8:54	12:44
7.10.2016	12	6	43 %	29 %	29 %	29 %	20,00	8:59	12:44
8.10.2016	11	5	53 %	31 %	31 %	31 %	20,50	9:00	12:44
9.10.2016	12	5	57 %	37 %	37 %	37 %	20,50	9:01	12:44
10.10.2016	11	5	53 %	29 %	29 %	29 %	20,50	9:02	12:44
11.10.2016	12	6	57 %	40 %	40 %	40 %	20,50	9:02	12:44
12.10.2016	11	5	54 %	27 %	27 %	27 %	20,50	9:03	12:44
13.10.2016	12	5	58 %	36 %	36 %	36 %	20,50	9:04	12:43
14.10.2016	11	5	60 %	35 %	35 %	35 %	20,50	9:05	12:43
15.10.2016	11	4	50 %	27 %	27 %	7 %	20,50	9:05	12:43
16.10.2016	10	4	56 %	30 %	30 %	7 %	20,50	9:06	12:43
17.10.2016	11	4	58 %	32 %	32 %	9 %	20,50	9:07	12:43
18.10.2016	11	6	51 %	33 %	33 %	33 %	20,50	9:08	12:43
19.10.2016	11	5	57 %	29 %	29 %	29 %	20,50	9:08	12:42
20.10.2016	10	6	51 %	36 %	36 %	36 %	20,50	9:09	12:42
21.10.2016	11	5	49 %	28 %	28 %	28 %	20,50	9:10	12:42
22.10.2016	10	5	44 %	26 %	26 %	26 %	20,50	9:11	12:42
23.10.2016	11	6	53 %	36 %	36 %	36 %	20,50	9:09	12:42
24.10.2016	10	5	54 %	34 %	34 %	34 %	20,50	9:12	12:42
25.10.2016	11	5	47 %	28 %	28 %	28 %	20,50	9:06	12:41
26.10.2016	11	5	50 %	31 %	31 %	31 %	20,50	9:14	12:41
27.10.2016	12	5	57 %	35 %	35 %	35 %	20,50	9:02	12:41
28.10.2016	12	5	62 %	35 %	35 %	35 %	20,50	9:08	12:41
29.10.2016	8	4	60 %	26 %	26 %	26 %	21,50	10:16	12:40
30.10.2016	7	5	45 %	30 %	30 %	11 %	21,50	10:16	12:40
31.10.2016	7	4	66 %	38 %	38 %	11 %	21,50	10:17	12:40

Taulukosta 21 havaitaan, että lokakuun loppua kohti teoreettiset kuvauskerrat putoavat jo kymmenen alapuolelle. Myös todennäköiset kuvauskerrat vähenevät ja kuvaus onnistuu keskimäärin vain joka toinen päivä. Kuitenkin yli viiden kuvauskerran vuorokausiakin on vielä todennäköisesti noin kolmen päivän välein. Kuvan 76 esimerkkisimuloinnista nähdään, että kuun lopussa sääolosuhteista johtuen voi olla jopa viikon ajanjakso jolloin kuvaaminen ei onnistu. Päivittäiset kuvausmahdollisuudet ovat noin klo 09:00 ja 13:00 välisenä aikana. Vuorokausittainen kuvausväli kasvaa kuun aikana noin 20 tunnista noin 21,5 tuntiin.

Kuvasta 78 nähdään myös se, miten sotilassatelliitit kykenevät kuvaamaan lähes koko kuukauden kaksi kertaa vuorokaudessa. Aivan kuun lopussa kuvauskerrat putoavat yhteen valoisajan vähäisyyden takia. Kiertoradoista johtuen valoisasta ajasta jää kuitenkin lähes puolet käyttämättä. Suurin osa satelliiteista ylittää kohdealueen jo ennen puolta päivää, vaikka valoa olisi vielä useampi tunti iltapäivälläkin. Ainakin kaikki sotilassatelliitit kykenisivät todennäköisesti kolmeen kuvaussuoritukseen vuorokaudessa, mikäli kiertoradat sopisivat paremmin kohdealueen kuvaamiseen.

Lokakuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkksimulointi sääolosuhteiden mahdollisista vaikutuksesta



Kuva 78. Lokakuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkksimulointi

MARRASKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

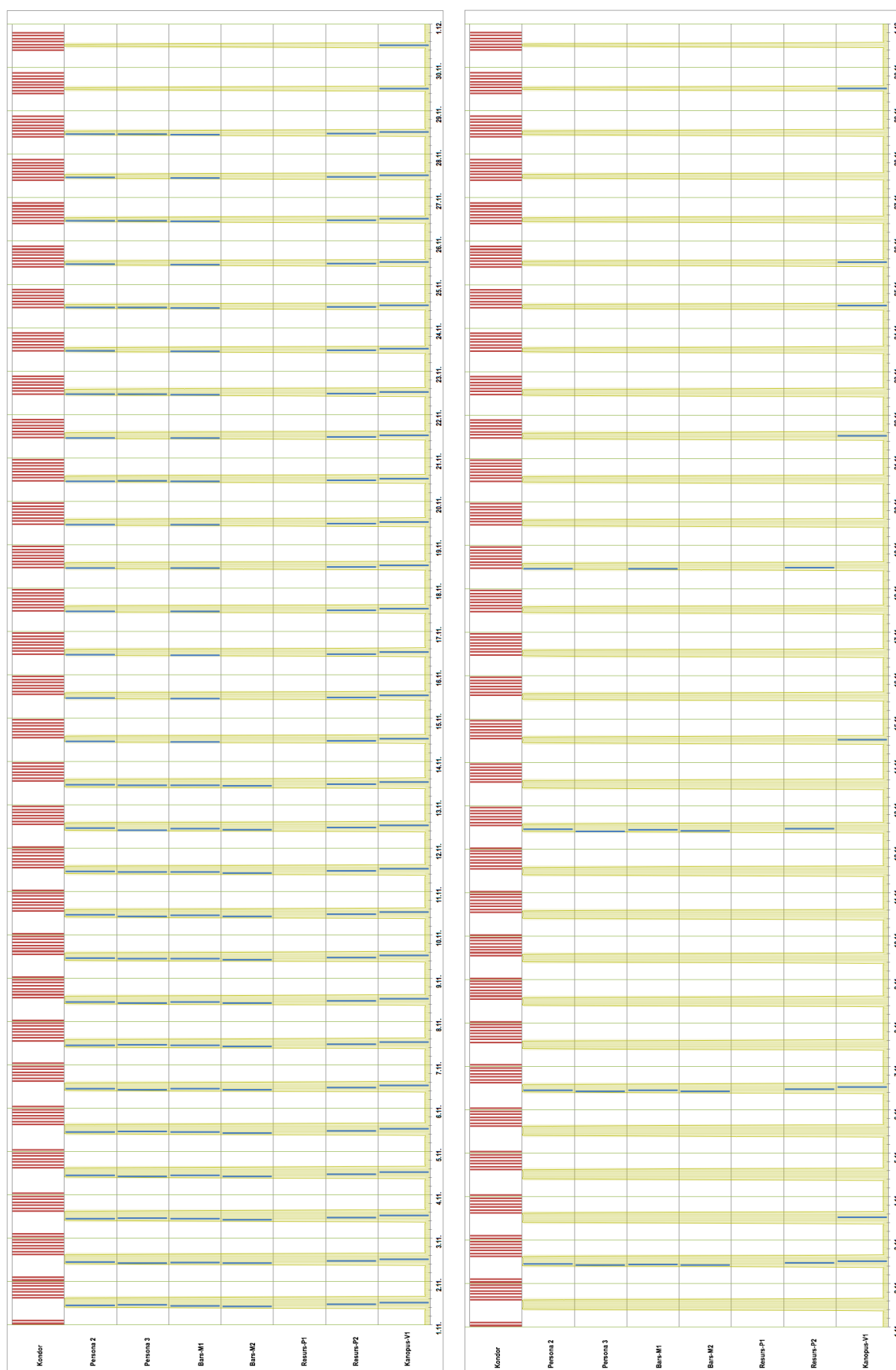
Taulukko 22. Marraskuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

Marraskuu 2016									
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:	
1.11.2016	6	3	34 %	16 %	16 %	0 %	21,50	10:18	12:40
2.11.2016	6	3	28 %	14 %	14 %	0 %	21,50	10:19	12:39
3.11.2016	6	3	32 %	17 %	17 %	0 %	21,50	10:20	12:39
4.11.2016	6	4	35 %	23 %	23 %	0 %	21,50	10:20	12:39
5.11.2016	6	4	26 %	16 %	16 %	0 %	21,50	10:21	12:39
6.11.2016	7	4	26 %	16 %	16 %	2 %	21,50	10:00	12:38
7.11.2016	7	4	26 %	15 %	15 %	2 %	21,50	10:07	12:38
8.11.2016	7	4	35 %	20 %	20 %	6 %	21,50	10:13	12:38
9.11.2016	7	4	29 %	15 %	15 %	2 %	21,50	10:20	12:37
10.11.2016	7	3	28 %	12 %	12 %	0 %	21,50	10:12	12:37
11.11.2016	7	4	39 %	22 %	22 %	2 %	22,00	10:26	12:37
12.11.2016	7	4	42 %	28 %	28 %	4 %	21,50	10:08	12:36
13.11.2016	6	3	37 %	21 %	21 %	0 %	22,00	10:28	12:36
14.11.2016	4	2	33 %	19 %	0 %	0 %	22,50	11:00	12:36
15.11.2016	4	2	22 %	10 %	0 %	0 %	22,50	11:01	12:35
16.11.2016	4	2	37 %	21 %	0 %	0 %	22,50	11:02	12:35
17.11.2016	4	2	36 %	20 %	0 %	0 %	22,50	11:03	12:35
18.11.2016	4	2	32 %	16 %	0 %	0 %	22,50	11:04	12:34
19.11.2016	4	2	26 %	12 %	0 %	0 %	22,50	11:04	12:34
20.11.2016	5	3	35 %	17 %	3 %	0 %	22,50	11:05	12:34
21.11.2016	4	2	38 %	20 %	0 %	0 %	22,50	11:06	12:33
22.11.2016	5	3	37 %	18 %	5 %	0 %	22,50	11:07	12:33
23.11.2016	4	2	38 %	15 %	0 %	0 %	22,50	11:08	12:32
24.11.2016	5	3	38 %	23 %	4 %	0 %	22,50	11:09	12:32
25.11.2016	4	2	39 %	16 %	0 %	0 %	22,50	11:09	12:32
26.11.2016	5	3	30 %	19 %	3 %	0 %	22,50	11:10	12:31
27.11.2016	4	2	30 %	17 %	0 %	0 %	22,50	11:11	12:31
28.11.2016	5	3	33 %	18 %	4 %	0 %	22,50	11:12	12:30
29.11.2016	1	1	12 %	0 %	0 %	0 %	24,00	12:30	
30.11.2016	1	1	19 %	0 %	0 %	0 %	24,00	12:30	

Taulukosta 22 voidaan havaita se, että jo marraskuun alussa kuvaustodennäköisyydet ovat pudonneet huomattavasti ja marraskuun lopussa taas osa satelliiteista ei kykene enää lainkaan kuvaamaan kohdealuetta. Kuvaus onnistuu keskimäärin vain kolmen tai neljän päivän välein ja todennäköisesti vuorokaudessa on ainoastaan kaksi tai kolme kuvauskertaa. Sama ilmiö voidaan havaita kuvan 79 esimerkkisimuloinnista, jossa alkukuussa muutamana päivänä saadaan neljä kuvaussuoritusta. Sen jälkeen ne harventuvat huomattavasti. Päivittäiset kuvausmahdollisuudet ovat noin klo 10:30 ja 12:30 välisenä aikana. Marraskuu on jälleen huonoa aikaa Suomessa optisen alueen satelliittikuvaukselle.

Kuvasta käy ilmi myös, miten yksikään satelliitti ei kykene enää kuvaamaan kahta kertaa vuorokaudessa ja myöskin se, että Resurs-P1 ei kiertoradastansa johtuen kykene kuvaamaan marraskuussa ollenkaan. Valon puolesta kuvausaikaa on vielä kuun lopussakin useampi tunti, joten satelliittien ratoja muuttamalla tarvittaessa vielä kuun lopussakin kyettäisiin kuvaamaan todennäköisesti kuvaamaan kaikilla satelliiteilla. Kuvausmäärät olisivat kuitenkin selkeästi lokakuuta vähäisempiä ja sääolosuhteista johtuen kuvauksen onnistuminen olisi myös kohtalaisen epätodennäköistä.

Marraskuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerkksimulointi sääolosuhteiden mahdollisista vaikutuksesta



Kuva 79. Marraskuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerkksimulointi

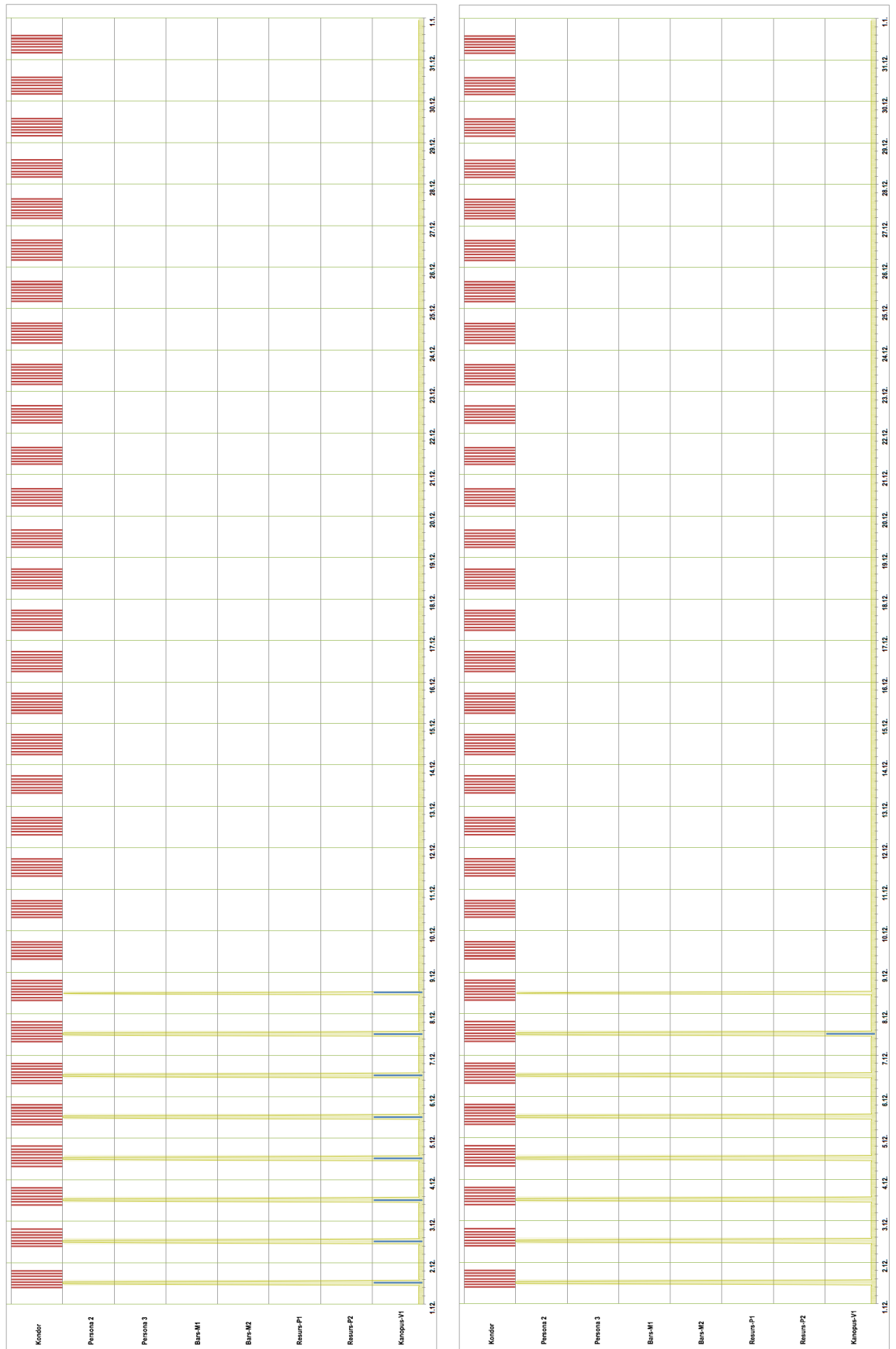
JOULUKUUN KUVAUSMAHDOLLISUUDET

Taulukko 23. Joulukuun teoreettiset ja todennäköiset kuvausmahdollisuudet

Joulukuu 2016								
Pvm	Teoreettisesti kuvausta / vrk	Todennäköisesti kuvausta / vrk	1 kuvaus onnistuu	3 kuvausta onnistuu	5 kuvausta onnistuu	7 kuvausta onnistuu	Väli edellisen vrk:n kuvaukseen (h)	ensimmäinen / viimeinen kuvaus klo:
1.12.2016	1	1	14 %	0 %	0 %	0 %	24,00	12:29
2.12.2016	1	1	18 %	0 %	0 %	0 %	24,00	12:29
3.12.2016	1	1	12 %	0 %	0 %	0 %	24,00	12:28
4.12.2016	1	1	19 %	0 %	0 %	0 %	24,00	12:28
5.12.2016	1	1	20 %	0 %	0 %	0 %	24,00	12:27
6.12.2016	1	1	17 %	0 %	0 %	0 %	24,00	12:27
7.12.2016	1	1	14 %	0 %	0 %	0 %	24,00	12:26
8.12.2016	1	1	13 %	0 %	0 %	0 %	24,00	12:26
9.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
10.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
11.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
12.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
13.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
14.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
15.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
16.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
17.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
18.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
19.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
20.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
21.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
22.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
23.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
24.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
25.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
26.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
27.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
28.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
29.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
30.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		
31.12.2016	0	0	0 %	0 %	0 %	0 %		

Taulukko 23 havainnollistaa kuinka nykyisillä kiertoradoilla vain yksi satelliitti kykenee edes teoriassa kuvaamaan kohdealuetta joulukuussa. Kuvausmahdollisuus on noin 24 tunnin välein, mutta kuvauksen onnistuminen on sääolosuhteista johtuen erittäin epätodennäköistä. Kuvan 80 esimerkkisimulointi havainnollistaa sen kuinka kyseisellä simulointikerralla kuitenkin yhtenä päivänä kuvaus oli onnistunut. Kuvasta 80 nähdään myös, miten 8. joulukuuta on viimeinen päivä, kun auringon korkeuskulma on yli seitsemän astetta. Tämän jälkeen optisen alueen kuvaus onnistuu seuraavan kerran tammikuussa. Joulukuu on Suomessa huonoin kuukausi optisen alueen satelliittikuvaukselle.

Joulukuu 2016 – Teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja yksi esimerk kisimulointi sääolosuhteiden mahdollisista vaikutuksista



Kuva 80. Joulukuun teoreettiset kuvausmahdollisuudet ja esimerk kisimulointi